

โครงการวิศวกรรมชลประทาน

(02207499)

ที่ 13/2558

เรื่อง การศึกษาการลดปริมาณการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรังโดยใช้เบนโทไนต์

A Study on Reduction of Water Seepage in Lateritic Soil by Bentonite

ดำเนินงานโดย

นาย ขวาล พรรคเจริญ

นาย ภิมา วันแรก

นาย นิพนธ์ สายแก้วราช

เสนอ

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา-ชลประทาน)

พุทธศักราช 2559

ใบรับรองโครงการวิศวกรรมชลประทาน

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง : การศึกษาการลดปริมาณการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรังโดยใช้เบนโทไนต์

A Study on Reduction of Water Seepage in Lateritic Soil by Bentonite

นามผู้ทำโครงการ	นาย ชวาล	พรรคเจริญ
	นาย ภิมา	วันแรก
	นาย นิพนธ์	สายแก้วราช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์)

..... /..... /.....

กรรมการ

(ผศ.ดร.พงศธร โสภากพันธ์)

..... /..... /.....

กรรมการ

(อ.ดร.ยุทธนา ตาละลักษมณ์)

..... /..... /.....

หัวหน้าภาควิชา ฯ

(ผศ.นิมิตร ฉีดฉันทพิพัฒน์)

..... /..... /.....

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาการลดปริมาณการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรังโดยใช้เบนโทไนต์
A Study on Reduction of Water Seepage in Lateritic Soil by Bentonite

โดย : นาย ชวาล พรรคเจริญ
 นาย ภิมา วันแรก
 นาย นิพนธ์ สายแก้วราช

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ:
(ผศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์)
...../...../.....

โครงการวิศวกรรมชลประทานนี้ ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังด้วยการใช้โซเดียมเบนโทไนต์ เพื่อลดค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ ดินลูกรังจะถูกนำมาผสมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปบรรจุในโมลทดสอบจำนวน 30 โมล โดยการแบ่งออกเป็น 10 กรณีศึกษา คือ นำดินกับเบนโทไนต์มาผสมกันในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้เบนโทไนต์ในการป้องกันการรั่วซึมของบ่อน้ำ คืออัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง และต้องใช้เบนโทไนต์ในอัตราส่วนอย่างน้อยร้อยละ 7 โดยน้ำหนักแห้ง สำหรับบ่อขะ

คำนิยม

โครงการวิศวกรรมฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการทำโครงการวิศวกรรมชลประทาน ครั้งนี้จนเป็นสำเร็จผล

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน ที่ได้อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่สำหรับการทำงาน ทุกอย่าง ซึ่งทำให้การดำเนินของโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.จิระกานต์ ศิริวิชญ์เมตรี ที่ได้อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ในการทำโครงการ ซึ่งทำให้การดำเนินของโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณสุรพล เจริญชีพ ที่คอยให้การช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำโครงการซึ่ง ทำให้การดำเนินของโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ประโยชน์และความดีทั้งหลาย อันพึงจะได้รับจากโครงการวิศวกรรมเล่มนี้ ผู้จัดทำ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และความสามารถ ต่างๆให้ผู้จัดทำ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กรกฎาคม 2559

ผู้จัดทำ

สารบัญ

รายการ	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
คำนิยาม	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญตารางผนวก	VII
สารบัญรูป	VIII
สารบัญรูปผนวก	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการวิจัย	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	3
2.1 ดิน	3
2.1.1 ความหมายของดิน	3
2.1.2 ส่วนประกอบของดิน	3
2.1.3 การแบ่งประเภทของดิน	4
2.1.4 ประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน	4
2.1.5 ขนาดของเม็ดดิน	4
2.1.6 การหาขนาดมวลกละของดิน (Sieve Analysis)	6
2.1.7 การกระจายของขนาดเม็ดดิน	6

2.2 ดินลูกรัง	7
2.2.1 ความหมายของดิน	7
2.2.2 ดินลูกรังในประเทศไทย	7
2.2.3 คำจำกัดความของดินลูกรัง	7
2.2.4 กระบวนการเกิดดินลูกรัง	8
2.3 เบนโทไนต์ (Bentonite)	9
2.3.1 ความหมายของเบนโทไนต์	9
2.4 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	19
3.1 อุปกรณ์	19
3.2 วิธีการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการศึกษาทดลอง	25
4.1 ผลการทดลอง	25
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	40
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก	44
ภาคผนวก ข	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของดินเม็ดหยาบแยกตามขนาดของเม็ดดิน	5
2.2 ชนิดของดินแยกตามมาตรฐานต่างๆ	5
2.3 แสดงวิธีทดสอบหาค่าความชื้นน้ำที่เหมาะสม	14
3.1 แสดงอัตราส่วนการผสมเบนโทไนด์	22
4.1 ผลการทดลองของดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ	38

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่	หน้า
1 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 1	45
2 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 2	46
3 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 3	47
4 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 4	48
5 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 5	49
6 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 6	50
7 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 7	51
8 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 8	52
9 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 9	53
10 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 10	54
11 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 11	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน	6
2.2 เบนโทไนด์	11
2.3 การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน	12
2.4 การไหลของปริมาณน้ำผ่านมวลดิน	15
3.1 ชุดทดสอบแบบPermeability Test	19
3.2 โมลทดสอบ	20
3.3 เบนโทไนด์	20
3.4 ดินลูกรังและเบนโทไนด์	21
3.5 การหาขนาดมวลคละของเม็ดดิน	21
3.6 ดินลูกรังที่ผสมกันแล้ว	22
3.7 ดินลูกรังที่ผสมกับเบนโทไนด์	23
3.8 ดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนด์ในแต่ละอัตราส่วน	23
3.9 การบรรจุดินลูกรังที่ผสมกับเบนโทไนด์ ลงในโมลทดสอบ	24
3.10 นำโมลทดสอบประกอบเข้ากับชุดทดสอบแบบ Permeability Test	24
4.1 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 1%	25
4.2 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 2%	26
4.3 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 3 %	27
4.4 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 4 %	28
4.5 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 5%	29
4.6 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 6%	30
4.7 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 7%	31
4.8 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 8%	32
4.9 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 9%	33
4.10 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนด์ 10%	34
4.11 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์	35
4.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองที่ผสมเบนโทไนด์ ในช่วง 1-10 วัน	36
4.13 กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองทั้งหมด	37
4.14 `กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยในวันที่ 10	38

สารบัญรูปผนวก

รูปผนวกที่	หน้า
1 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 1%	45
2 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 2%	46
3 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 3%	47
4 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 4%	48
5 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 5%	49
6 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 6%	50
7 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 7%	51
8 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 8%	52
9 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 9%	53
10 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 10%	54

บทที่ 1 บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการทำเกษตร จำเป็นต้องใช้น้ำในการเพาะปลูก ปัญหาหลักๆเกิดจากการขาดแคลนน้ำ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพอ ฝนตกไม่ถูกต้องตามฤดูกาล การอยู่นอกเขตชลประทาน การแก้ปัญหาอาจมีหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาการใช้น้ำให้มีประสิทธิภาพ การวางแผนการใช้น้ำ แต่ที่เกษตรกรต้องทำอยู่แล้วนั้น คือ การขุดสระเพื่อใช้กักเก็บน้ำ ไม่ว่าจะเป็นน้ำฝน น้ำจากชลประทาน น้ำที่ได้จากธรรมชาติ

ในการขุดสระเพื่อกักเก็บน้ำไว้ใช้นั้น ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของดิน และ สภาพพื้นที่ของสระ โดยสระน้ำบางแห่งถูกขุดขึ้นโดยน้ำสามารถไหลเข้าได้น้อย แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นมักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน ซึ่งไม่สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ ปัญหาการรั่วซึมสามารถแก้ได้ด้วยการปูแผ่นพื้นพลาสติก การเทคอนกรีต การบดอัด การใช้สารเคมี เป็นต้น

จากข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินระบุว่าประเทศไทยมีพื้นที่ที่เป็นดินลูกรังอยู่ประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 13.4 % ของพื้นที่ทั้งหมดในประเทศไทย ซึ่งดินลูกรังส่วนใหญ่จะพบอยู่ในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แม้ว่าดินเหล่านี้จะถูกจำแนกออกเป็นดินที่มีปัญหา แต่ด้วยพื้นที่ทางการเกษตรที่มีอยู่อย่างจำกัด ดินเหล่านี้จึงได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตร อาทิ ปลูกพืชไร่ หรือพืชเศรษฐกิจอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีการขุดสระเก็บน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ในความเป็นจริงแล้วดินลูกรังมีสภาพไม่อุ้มน้ำและไม่เหมาะสมสำหรับการขุดสระเก็บน้ำ แต่ด้วยพื้นที่ทางการเกษตรที่มีจำกัด จึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีการปรับปรุงดินลูกรังให้เหมาะสมต่อการขุดสระเก็บน้ำ

การวิจัยครั้งนี้จะเน้นศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังด้วยการใช้โซเดียมเบนโทไนด์ เพื่อให้ค่าการซึมผ่านได้ของน้ำลดต่ำลง โดยการหาอัตราส่วนการผสมเบนโทไนด์ที่เหมาะสม ที่จะช่วยลดการซึมผ่านได้ของน้ำ

วัตถุประสงค์

1. หาอัตราส่วนการผสมเบนโทไนต์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการใช้งาน เพื่อลดค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดินลูกรัง

ขอบเขตการวิจัย

1. การวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดลองปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรัง เพื่อช่วยลดอัตราการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรัง
2. การวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดลองโดยการควบคุมระดับน้ำให้คงที่ตลอดเวลา
3. การทดลองใช้ดินลูกรังโดยไม่มีการบดอัด
4. ดินลูกรังที่นำมาใช้เป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินที่ละเอียด

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ดิน

2.1.1 ความหมายของดิน

ดินเกิดจากการกัดกร่อน ผุพัง และแตกสลายของหินต่างๆ โดยธรรมชาติ ทั้งจากอิทธิพลของดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น ความกดดัน แรงดึงดูดของโลก และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แล้วมีการเคลื่อนย้ายพัดพา โดยตัวกลางต่างๆ เช่น ลม น้ำ ธารน้ำแข็ง เป็นต้น นำไปตกตะกอนทับถมในที่ต่างๆ เป็นชั้นของดินขึ้นมา ทำให้คุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นและแต่ละแห่งแตกต่างกันไปไม่เหมือนกัน วิศวกรได้แบ่งวัสดุที่ตกตะกอนทับถมกันเป็นผิวโลกออกเป็นดินและหิน ดินคือส่วนที่ตกตะกอนและทับถมไม่แน่น สามารถแยกออกจากกันได้ง่ายๆ เช่น นำไปละลายน้ำ เป็นต้น หินคือส่วนที่แข็งและยึดจับตัวแน่นมาก ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ง่ายๆ เหมือนดิน

ดังนั้น ความหมายของดินในทางวิศวกรรมคือ วัสดุอะไรก็ตามที่ตกตะกอนและทับถมกันไม่แน่น เช่น กรวด (Gravel) ทราย (Sand) ตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านี้ ซึ่งอาจเป็นพวกที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesion) หรือไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesion less) ก็ได้

2.1.2 ส่วนประกอบของดิน

ดินประกอบด้วยเนื้อดินหรือเม็ดดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งในช่องว่างอาจจะเต็มไปด้วยน้ำหรืออากาศ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งน้ำและอากาศปนกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ดินประกอบด้วย

1. ของแข็ง คือ เนื้อดินหรือเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นแร่ธาตุต่างๆ
2. ของเหลว ซึ่งอยู่ในระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นน้ำ
3. ก๊าซ ซึ่งอยู่ในระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นอากาศ

ถ้าช่องว่างเต็มไปด้วยอากาศ เรียกว่า ดินแห้ง (Dry soil)

ถ้าช่องว่างเต็มไปด้วยน้ำ เรียกว่า ดินอิ่มตัว (Saturated soil)

ถ้าช่องว่างมีทั้งน้ำและอากาศ เรียกว่า ดินชื้น หรือดินเปียก (Partially saturated soil หรือ

Moist soil หรือ Wet soil)

2.1.3 การแบ่งประเภทของดิน

นอกจากการแบ่งประเภทของดินตามลักษณะการเกิดแล้ว ดินยังสามารถแบ่งตามเกณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น แบ่งตามขนาดของเม็ดดิน แบ่งตามความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดิน เป็นต้น

2.1.4 ประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดิน

การแบ่งประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดินสามารถแยกดินออกได้เป็น 4 ประเภทได้แก่ กรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว โดยกรวดและทรายจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดหยาบ ในขณะที่ดินตะกอนและดินเหนียวถูกจัดอยู่ในกลุ่มของดินเม็ดละเอียด

1. กรวด (Gravel) มีลักษณะเหมือนเศษก้อนหิน สามารถมองเห็นและแยกออกเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปกรวดมีขนาดตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรจนถึง 150 มิลลิเมตร

2. ทราย (Sand) มีขนาดเล็กกว่ากรวด สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะเม็ดทรายจะค่อนข้างกลมและมักจะมีแร่เฟลด์สปาร์เป็นส่วนประกอบ ขนาดของเม็ดทรายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.075 มิลลิเมตรถึง 2 มิลลิเมตร

3. ดินตะกอน (Silt) มีขนาดเล็กมากประมาณ 0.002 มิลลิเมตรถึง 0.075 มิลลิเมตร ดินประเภทนี้ไม่สามารถแยกเม็ดได้ด้วยตาเปล่า ลักษณะรูปร่างจะเป็นแผ่นบางๆ และมักจะมีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบ

4. ดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดดินของดินเหนียวจะมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร) จึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เม็ดดินมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ ตามลักษณะของแร่ดินเหนียว ลักษณะพิเศษอีก อย่างหนึ่งของดินเหนียวคือสามารถแสดงสภาพพลาสติกได้

2.1.5 ขนาดของเม็ดดิน

ดินแต่ละชนิดจะมีขนาดของเม็ดดินแตกต่างกัน การแบ่งชนิดของดินเบื้องต้นจึงอาจใช้ขนาดของเม็ดดินเป็นตัวกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินยังขึ้นอยู่กับ มาตรฐานที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ชนิดของดินเม็ดหยาบแยกตามขนาดของเม็ดดิน

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)
หิน (Boulders)	<300
กรวดหยาบ (Cobbles)	76-300
กรวด (Gravel)	4.75-76
ทรายหยาบ (Coarse Sand)	2-4.75
ทรายหยาบปานกลาง (Medium Sand)	0.425-2
ทรายละเอียด (Fine Sand)	0.074-0.425
ดินตะกอน (Silt)	0.002-0.074
ดินเหนียว (Clay)	<0.002

ตารางที่ 2.2 ชนิดของดินแยกตามมาตรฐานต่างๆ

ชนิดของดิน	ขนาดของเม็ดดิน (ม.ม.)			
	MIT	AASHTO	FAA	Unified
กรวด (Gravel)	2.00 - 100	2.00 - 100	2.00 - 100	4.76 - 100
ทราย (Sand)	0.06 - 2.00	0.074 - 0.074	0.074 - 2.00	0.074 - 4.76
ดินตะกอน (Silt)	0.002 - 0.06	0.002 - 0.074	0.005 - 0.074	0.002 - 0.074
ดินเหนียว (Clay)	<0.002	<0.002	<0.005	<0.002

หมายเหตุ

MIT คือ Miracle International Technology co. Ltd

AASHTO คือ American Association of State Highway and Transportation Officials

FAA คือ Federal Aviation Association

Unified คือ Unified Communications System

2.1.6 การหาขนาดมวลผละของดิน (Sieve Analysis)

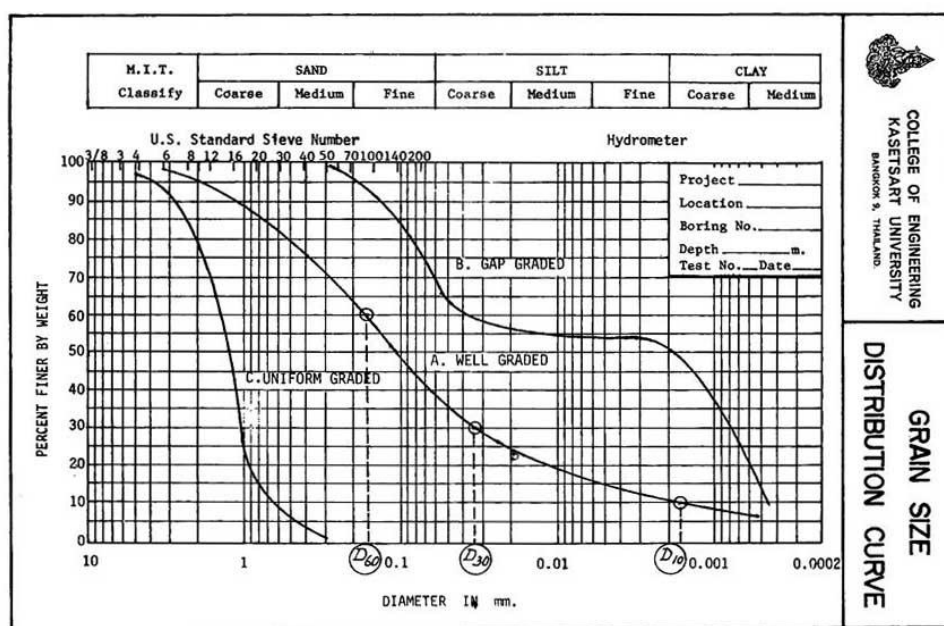
การหาขนาดมวลผละของดินเหมาะสำหรับดินเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย การทดสอบโดยวิธีนี้ทำได้โดยการนำดินที่ต้องการหาขนาด นำไปในร่อนตะแกรงขนาดมาตรฐาน ซึ่งตะแกรงที่ใช้ร่อนนั้นมีหลายขนาด โดยจัดให้ตะแกรงขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ข้างบนและขนาดเล็กที่สุดอยู่ข้างล่าง ขนาดเล็กสุดเป็นตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งมีขนาดรูตะแกรงเท่ากับ 0.075 มม. เมื่อทำการร่อนผ่านตะแกรงเสร็จแล้ว จะนำมาชั่งเพื่อคำนวณหาปริมาณดินส่วนที่ค้างหรือผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ เป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำหนักดินทั้งหมดดังสมการด้านล่าง

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักของดินแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักของดินทั้งหมด}} \times 100$$

เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม หากจากผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่ใหญ่กว่าเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง(%Passing หรือ %Finer หรือ %Smaller) = 100 - เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม ส่วนเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์200 นำมาวิเคราะห์วิธีไฮโดรมิเตอร์จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟก็จะได้ค่าประมาณร้อยละของดินเหนียวจากการทราบปริมาณร้อยละของขนาดเม็ดดินนั้น

2.1.7 การกระจายของขนาดเม็ดดิน

การกระจายของขนาดเม็ดดิน มักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินในสเกลลอการิทึม (Logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ (2559)

2.2 ดินลูกรัง

2.2.1 ความหมายของดิน

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้นมี อุณหภูมิและความชื้นสูง และจากการศึกษาของ Russel (1989) พบว่าอุณหภูมิที่อบอุ่นและมี ความชื้นสูงมีอิทธิพลต่อการผุพังของหินมากกว่าอุณหภูมิที่เย็นและมีความชื้นต่ำ การผุพังใน กระบวนการเกิดดินลูกรังส่วนมากเป็นการผุพังทางเคมี ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสภาพของแร่ที่ประกอบอยู่ ในหิน หรือในตะกอนที่สะสมตัวอยู่บริเวณนั้น โดยอาจจะมีการผุพังทางกลศาสตร์จากการแตกหักของ หินต้นกำเนิดร่วมด้วย ดังนั้นดินลูกรังจึงมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง แต่มีลักษณะทั่วไปที่ เด่นชัด คือดินมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Secondary oxide of iron) และอลูมิเนียม (Aluminum) ใน ปริมาณสูง และในบางครั้งอาจจะมีซิลิกา (Silica) แร่ควอตซ์ (Quartz) และคาโอลิไนท์ (Kaolinite) ในปริมาณสูง ลักษณะพิเศษของดินลูกรัง คือ มีคุณสมบัติที่แข็งตัวได้เมื่อสัมผัสกับอากาศ

2.2.2 ดินลูกรังในประเทศไทย

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น ซึ่งสภาพภูมิอากาศดังกล่าวเหมาะสมกับ การเกิดดินลูกรังอย่างยิ่ง จากข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินระบุว่าประเทศไทยมีพื้นที่ที่เป็นดินลูกรังอยู่ ประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 13.4 % ของพื้นที่ทั้งหมดในประเทศไทย ซึ่งดินลูกรัง ส่วนมากจะพบอยู่ในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Hongsnoi (1969) พบว่าดินลูกรังที่พบในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิดดังนี้

1. Primary Lateritic Soils คือ ดินลูกรังที่มีเหล็กออกไซด์เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่สูง และเกิดอยู่เหนือวัตถุต้นกำเนิด เหล็กที่เป็นองค์ประกอบจะได้มาจากแร่เฟอร์โรแมกนีเซียม (Ferromagnesian) ที่มีอยู่ในหินชั้นล่าง เหล็กออกไซด์จะเกิดการสะสมในชั้นดินเนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงระดับของน้ำใต้ดินในแต่ละฤดูกาล โดยที่น้ำฝนจะทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์แร่เฟอร์โร แมกนีเซียม เนื่องจากในน้ำฝนจะมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์ละลายอยู่ การเกิดดินลูกรังประเภทนี้ มักจะเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นของหินต้นกำเนิด

2. Secondary Lateritic Soils คือ ดินลูกรังที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนย้ายมาจากแหล่งหินต้น กำเนิด น้ำใต้ดินที่ไหลผ่านจะทำให้เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในดินแข็งตัวและยังทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์ แร่เหล็กที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดินลูกรังประเภทนี้โดยทั่วไปจะไม่แบ่งเป็นหลายๆชั้น เหล็กออกไซด์ ในดินประเภทนี้จะอยู่กระจุกกระจายมากกว่าดินลูกรังประเภท Primary Lateritic Soils

2.2.3 คำจำกัดความของดินลูกรัง

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน ปี 2544 ได้ให้ความหมายไว้ว่า ดินลูกรัง คือดินที่มีการสลายตัวและพัฒนามาเป็นระยะเวลาอันยาวนานภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีเหล็ก และอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณสูง อันเป็นผลมาจากกระบวนการเกิดลูกรัง (Laterization) ส่วน ใหญ่มีสีแดง น้ำตาล หรือเหลือง มักพบเป็นเม็ดลูกรังและเม็ดกรวดผสมปนอยู่

Alexander และ Cady (1962) ได้รวบรวมงานวิจัยทางด้านธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับดินลูกรัง โดยให้ความหมายไว้ดังนี้

Buchanan (1807) เป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า “laterite” โดยคำว่า laterite มาจากรากศัพท์ภาษาละตินซึ่ง later แปลว่า “อิฐ” โดยใช้เรียกดินที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดียซึ่งหมายถึงดินที่มีสีแดงอิฐ (brick-red rock) มีความแข็งคล้ายอิฐ เนื่องจากมีเหล็กผสมอยู่ในปริมาณสูง มีความพรุนไม่แบ่งชั้น มีความอ่อนพอที่จะตัดเป็นแผ่นขนาดเท่าอิฐได้ และเมื่อขุดพบจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ จึงนิยมนำมาทำเป็นอิฐเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง

Mallet (1883) เป็นผู้ให้คำจำกัดความทางเคมีของดินลูกรัง (Laterite Soil) ว่าเป็นดินที่มีสีแดงตามธรรมชาติ เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมผสมอยู่

Bauer (1898) ได้ให้ความหมายของดินลูกรังว่าหมายถึงวัสดุที่มีสารประกอบของซิลิกาและปริมาณของอลูมิเนียมในรูปของไฮดรอกไซด์สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของ bauxite (แร่ชนิดหนึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม)

Ferner (1911) ได้พัฒนาการเรียกชื่อลูกรังตามแร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรัง ซึ่งแร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรังได้แก่ เหล็ก อลูมิเนียม ไทเทเนียม และแมงกานีส

Lacroix (1913) ได้จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- True Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบมากกว่า 90 %
- Silicate Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 50 – 90 %
- Laterite Clay มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 10 – 50 %

Matin และ Doyne (1927) ได้แบ่งชนิดของดินลูกรังตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- True Laterite มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ น้อยกว่า 1.33
- Silicate Laterite มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 1.33 – 2.00
- Laterite Clay มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.00

2.2.4 กระบวนการเกิดดินลูกรัง

กระบวนการเกิดดินลูกรังแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

1. Decomposition เป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่ทำให้วัตถุต้นกำเนิดดินสลายตัวเป็นสารประกอบออกไซด์ประเภทต่างๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และอื่นๆที่อยู่ในรูปของอนินทรีย์สาร

2. Laterization เป็นกระบวนการที่ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ถูกชะล้างออกไปเนื่องจากมีการระบายน้ำที่เหมาะสม แต่เหลือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) จึงเกิดการรวมตัวกันของพวกซิลิกา ต่างและสารประกอบออกไซด์

3. Dehydration หรือ Desiccation เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความสูญเสียความชื้น เป็นผลทำให้เกิดการแข็งตัวและการสูญเสียความชื้นในสารละลายที่มีออกไซด์ของเหล็กปนอยู่จะทำให้ความเข้มข้นของเพิ่มขึ้น จนเกิดการตกผลึกของเหล็กออกไซด์ในรูปของ Geothite Lemonite และ Hematite กระบวนการแข็งตัวของลูกรังที่เกิดจากเหล็กออกไซด์ทั้ง 3 รูปแบบ เคลือบอยู่ที่บนอนุภาคของดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ Hematite

กระบวนการ Decomposition และ Laterization เป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่ทำให้เกิดแร่ดินเหนียวในกลุ่มของแร่คาโอลินท์ (Kaolinite Group) เมื่อเวลาผ่านไปซิลิกาและแร่ดินเหนียวจะถูกชะล้างออกไป จะเหลือแต่สารประกอบออกไซด์ของอลูมิเนียม เช่น Gibbsite หรือออกไซด์ของเหล็ก เช่น Geothite หรือ Lemonite กระบวนการพัฒนาดังกล่าวถูกเรียกว่า “ กระบวนการก่อกำเนิดลูกรัง (Laterization Process) ” Mohr and Van Beren (1954)

2.3 เบนโทไนต์ (Bentonite)

2.3.1 ความหมายของเบนโทไนต์

เบนโทไนต์เป็นแร่ดิน (Clay Mineral) ที่มีคุณสมบัติการพองตัวสูง ถูกตั้งชื่อจากสถานที่ ที่มีการขุดขึ้นมาใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก คือที่ ฟอर्टเบนทอน มลรัฐไวโอมิ่ง สหรัฐอเมริกา (Fort Benton, Wyoming USA)

โซเดียมเบนโทไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถในการพองตัวได้มาก 15-20 เท่าจากปริมาตรเดิม มีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่น และกันการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลน และใช้อุดหรือยาแนวขอบเขื่อนทำนบ สำหรับเคลือบซีเมนต์และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสี หรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปตัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้แอคติเวเตดเคลย์ (Activated clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนต์

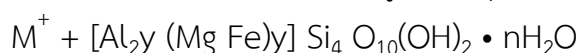
ในทางธรณีวิทยา เบนโทไนต์ อยู่ในตระกูลของแร่ดิน มีสัดส่วนจำนวนธาตุองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปตามแหล่งที่พบ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่ไม่ซ้ำกัน ส่วนใหญ่กำเนิดมาจากภูเขาไฟ ในยุคทางธรณีวิทยายุคที่สาม (ยุคที่ไดโนเสาร์สูญพันธุ์แล้ว คือ ยุคครีตาเซียส (146 ล้านปี ถึง 63 ล้านปีก่อน)) หรืออาจจะเป็นตั้งแต่ยุคที่ไดโนเสาร์ยังมีชีวิตอยู่ คือยุคจูราสสิก(190 ล้านปี ถึง 146 ล้านปีก่อน)

ในทางทรัพยากรธรณี แร่เบนโทไนต์ ประกอบด้วย แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite: ซิลิเกตที่มีลักษณะอ่อน และคล้ายดิน) เป็นหลัก ปะปนอยู่ร่วมกับแร่ธาตุต่างๆ

เช่น เฟลด์สปาร์ Feldspar, แคลไซต์ Calcite, ซิลิกา Silica, ยิปซัม Gypsum, ฯลฯ แร่มอนต์มอริลโลไนท์ Montmorillonite อยู่ในกลุ่มดินสมัคไตต์ Smectite ซึ่งรวมถึงแร่ที่มีคุณสมบัติการทำงานคล้ายคลึงกันเช่น ไบเดลไลต์ Beidellite, ซาโปไนต์ Saponite, เฮคโตไรต์ Hectorite

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด ขนาดเล็กๆซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล อลูมิเนียมไฮดรอกซิลโมเลกุลแปดระนาบ Octahedral Aluminum Hydroxyl อยู่ตรงกลางระหว่าง แผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิโคน ออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิด Siliconoxygen Tetrahedral โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน ในแร่มอนต์มอริลโลไนท์ตามธรรมชาติ, ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม, โซเดียม หรือ แมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่

ในทางเคมี แร่มอนต์มอริลโลไนต์ สามารถเขียนเป็นสูตรโมเลกุล ได้ดังนี้:



โดยที่ M^+ หมายถึงประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกัน อาจเป็นได้ทั้งแคลเซียม หรือ โซเดียม

โครงสร้างทางกายภาพของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ Montmorillonite คือ กลุ่มของเกล็ดหรือผลึก ที่มีระนาบฐานที่กว้าง แตกต่างกันในช่วงความยาวที่ 0.2-2.0 ไมครอน (10^{-6} เมตร) และความหนาที่ 6-10 ไมครอน ซึ่งในความเป็นจริง ลักษณะและการก่อตัวของผลึก สามารถแตกต่างกันไปได้ ตามการกำเนิด และลักษณะเฉพาะที่ของแหล่งแร่

ลักษณะและคุณสมบัติของ Bentonite มีความซับซ้อนและยังค่อนข้างมีความเฉพาะตัว แตกต่างกันไปตามแหล่งแร่ คุณสมบัติทาง “เคมี-กายวิภาค” คือการมีขนาดของอนุภาคละเอียดมาก และการมีประจุบวก ที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเรื่องการดูดซับ และการเคลื่อนตัว นอกจากนั้น คุณสมบัติเหล่านี้ยังก่อให้เกิด การนำไปใช้งานแบบใหม่ๆ ได้อย่างมากมาย หลังจากการถลุงและแปรรูป

แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลกอยู่ที่เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม (CIS) ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และ ตุรกี โดยคิดเป็นร้อยละ 84 ของกำลังการผลิตโลกในปี 1995 และจากการสำรวจแหล่งดินเบนโทไนต์ พบว่ามีปริมาณสำรองอยู่ 1452 ล้านตัน ในขณะที่มีปริมาณการใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 9.8 ล้านตันต่อปี ในปี 1997-1998 พบว่าราคาเฉลี่ยของดินดิบชนิดนี้อยู่ที่ 98 เหรียญสหรัฐต่อตัน และเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ แล้ว ราคาจะอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 50 ถึง 250 เหรียญสหรัฐต่อตัน ขึ้นอยู่กับสมบัติ ปริมาณ และความต้องการ สำหรับประเทศไทย เบนโทไนต์นี้จะพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์



รูปที่ 2.2 เบนโทไนต์

ที่มา: บริษัท เทพเกษตร อุตสาหกรรม จำกัด

2.4 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากมาตรฐาน ASTM D 2434 – 68

มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ดังนั้นเมื่อน้ำที่มีความดันต่างกันระหว่าง 2 จุดในมวลดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างเหล่านั้น ความสามารถที่มวลดินให้น้ำซึมผ่านไปได้นี้ เรียกว่า “ความซึมน้ำของดิน” (Permeability), k ถ้ามวลดินที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย ค่า k ก็สูง เรามักเรียกว่า “ชั้นดินที่บึ้นน้ำ” (Pervious Soil) ถ้าน้ำซึมผ่านได้มาก ค่า k ต่ำ จะเรียกว่า “ชั้นดินไม่ที่บึ้นน้ำ” (Impervious Soil)

ค่าความซึมน้ำของดิน เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินหลายอย่าง เช่น การรั่วซึมของน้ำที่เก็บกักโดยการปิดกั้นโดยเขื่อนดิน, ความมั่นคงของลาดเขื่อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำภายในตัวเขื่อน, อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเกิดจากน้ำหนักสิ่งก่อสร้าง, ความมั่นคงและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อที่ขุดเพื่อก่อสร้างฐานราก, และแม้กระทั่งปริมาณน้ำที่สามารถสูบขึ้นมาใช้ได้จากการเจาะน้ำบาดาล

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำได้ในสนาม (Field permeability test) ทำโดยการเจาะฝังท่อลงไปในดิน ถ้าชั้นดินที่ต้องการหาค่าความซึมน้ำได้อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ให้ใช้วิธีสูบน้ำลงไปหลุมเจาะ ถ้าชั้นดินอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน จะใช้วิธีสูบน้ำเข้าในหรือออกจากหลุมเจาะก็ได้ แล้ววัดอัตราการไหลของน้ำที่จะรักษาระดับความดันคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ

การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน เป็นแบบ “Laminar Flow” ผ่านช่องคดเคี้ยวระหว่างเม็ดดิน ในขณะที่เดียวกันแรงดันของน้ำก็จะเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวเม็ดดิน Darcy นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้เสนอกฎแห่งการไหลซึมไว้ว่า “ความเร็วของการไหลซึมของของเหลวผ่านตัวกลางพรุน (เช่นมวลดิน) จะเป็นปฏิภาคกับกับไฮดรอลิกเกรเดียนต์ (Hydraulic Gradient)”



รูปที่ 2.3 การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน
ที่มา: สุทธิศักดิ์ (2559)

การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน

$$\text{จาก } V \propto i \text{ หรือ } V = Ki \quad \dots\text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ	v	= ความเร็วของการไหลซึม (LT^{-1})
	i	= ความชันชลศาสตร์ = $\frac{\Delta h}{\Delta L}$
	k	= ความซึมของตัวกลาง ซึ่งเป็นค่าคงที่ (LT^{-1})
	Δh	= ความต่างของระดับน้ำ (Head Difference)
	ΔL	= ช่วงความยาวของการซึม

จากสูตร $v = ki$ จะนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ปัญหาทางการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินได้เกือบทุกแบบ สิ่งสำคัญคือค่าคงที่ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของชั้นดินที่เรียกว่าค่าความซึมน้ำ (Permeability) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งต่อไปนี้

1. ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน (Grain Size and Shape) แต่ที่จริงแล้วค่าความซึมน้ำควรจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากกว่าแต่คุณสมบัติทั้งสองของมวลดินมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เช่น ดินที่มีเม็ดเล็กบางและเป็นแผ่น ช่องว่างที่น้ำซึมผ่านก็มักจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน Allen Hazen ได้เสนอว่าในทรายและกรวด ค่าความซึมน้ำจะสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดดิน ดังนี้

$$K = 100 * (D_{10})^2 \text{ ซม./วินาที} \quad \dots\text{สมการที่ 2}$$

โดย D_{10} = ขนาดเม็ดเมื่อมี 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นเม็ดที่เล็กกว่าที่ระบุ (ซ.ม.)

2. ความหนืดของของเหลวที่ซึมผ่าน (Viscosity of Pore Fluid) ในทางวิศวกรรมโยธามักเกี่ยวข้องกับน้ำเท่านั้น แต่ความหนืดของน้ำก็อาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอุณหภูมิ และมักจะยึดถือเอาความหนืดที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเกณฑ์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลง ทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย ดังนั้นค่าความซึมผ่าน η . อุณหภูมิต่างๆ อาจมีความสัมพันธ์กันที่อุณหภูมิ 20°C ดังนี้

$$K_T = K_{20} \times \frac{\eta_{20}}{\eta_T} \quad \dots\text{สมการที่ 3}$$

โดย η_{20} , η_T เป็นความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C และ T°C ตามลำดับ

3. ความพรุนรวมของดิน (E) หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนระหว่างปริมาตรของสิ่งที่ไม่ใช่ของแข็งและปริมาตรรวมของดิน สามารถหาได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$E = \frac{V_{ns} \times 100}{V_b} \quad \dots\text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ E = ความพรุนของดิน

V_{ns} = ปริมาตรที่ไม่ใช่ของแข็ง

V_b = ปริมาตรทั้งหมดของดิน

ถ้าต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของดินทั้งหมด กับความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นของอนุภาคของดิน สามารถหาได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$E = \left(1 - \frac{D_b}{D_s}\right) \times 100 \quad \dots\text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ E = ความพรุนของดิน

D_b = ความหนาแน่นรวม

D_s = ความหนาแน่นอนุภาค

4. สัดส่วนของช่องว่าง (e) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของส่วนที่ไม่เป็นของแข็ง (V_{ns}) กับปริมาตรส่วนที่เป็นของแข็ง (V_s) มีสูตรดังนี้

$$e = \frac{V_{ns}}{V_s} \quad \dots\text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ e = สัดส่วนของช่องว่าง

V_{ns} = ปริมาตรของส่วนที่ไม่เป็นของแข็ง

V_s = ปริมาตรส่วนที่เป็นของแข็ง

ถ้าต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของช่องว่างกับความหนาแน่น สามารถหาได้ตามสูตรดังต่อไปนี้

$$e = \left(\frac{D_s}{D_b} \right) - 1 \quad \dots \text{สมการที่ 7}$$

เมื่อ e = สัดส่วนของช่องว่าง

D_s = ความหนาแน่นของอนุภาค

D_b = ความหนาแน่นรวม

ถ้าต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนทั้งหมดกับสัดส่วนของช่องว่าง สามารถหาได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$E = \frac{100 \times e}{(100 - E)} \quad \dots \text{สมการที่ 8}$$

หรือ

$$e = \frac{E}{(100 - E)}$$

5. ความอิ่มตัวของมวลดิน (Degree of Saturation) เมื่อมวลดินไม่อิ่มตัว ย่อมจะมีฟองอากาศคอยกั้นช่องว่าง ทำให้น้ำไหลซึมไม่สะดวก ดังนั้นในการทดลองในห้องปฏิบัติการจึงมักใช้ตัวอย่างดินที่อิ่มตัว เพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลนี้

การทดลองหาค่าความชื้นน้ำอาจทำได้หลายวิธี เช่น แบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) หรือความดันน้ำเปลี่ยนแปลง (Variable head) หรือแม้แต่ทดสอบในสนาม ดังนั้นการเลือกใช้วิธีทดลองจึงมีส่วนสำคัญ ซึ่งพอจะแนะนำได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงวิธีทดสอบหาค่าความชื้นน้ำที่เหมาะสม

ลักษณะดิน	ช่วงค่าความชื้นน้ำ ช.ม./วินาที	วิธีที่ควรใช้
ดินเหนียวคงสภาพ	$10^{-5} - 10^{-9}$	Variable head Consolidometer
ดินทราย	$10^{-1} - 10^{-4}$	Constant head
ดินลูกรังบดอัด	$10^{-3} - 10^{-8}$	Constant head โดยใช้ความดันเข้าช่วย
ดินเหนียวบดอัด	$10^{-4} - 10^{-9}$	Constant head หรือ Consolidometer

การทดลองหาค่าความซึมน้ำโดยวิธีความดันคงที่ (Constant head)

จากสมการ $v = ki$ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินเท่ากับ A



รูปที่ 2.4 การไหลของปริมาณน้ำผ่านมวลดิน
ที่มา: สุทธิศักดิ์ (2559)

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินจะเท่ากับ

$$Q = VA = KiA$$

...สมการที่ 9

เมื่อ K = ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างดิน ซึ่งต้องการทราบ

$$i = \text{ไฮโดรลิกเกรเดียน} = \frac{h}{L}$$

เมื่อแทนค่า i แล้วหาค่า k ในเทอมตัวแปรต่าง ๆ จะได้

$$K = \frac{QL}{Ah}$$

...สมการที่ 10

เมื่อ

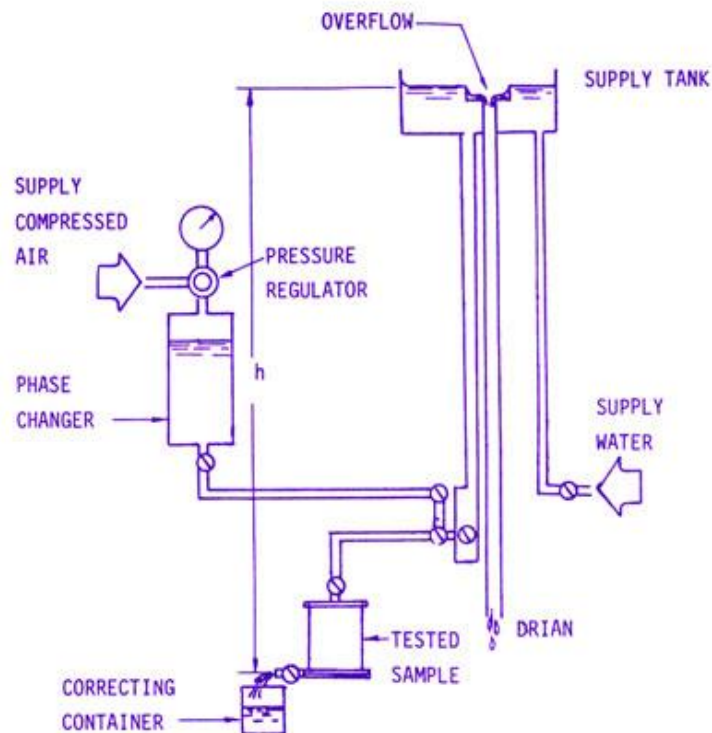
Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ , ซม.³ / วินาที

L = ความยาวของตัวอย่างดิน , ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน , ซม.²

K = ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างดิน

h = ความต่างของระดับน้ำ (ดังรูปที่ 2.5) , ซม.



รูปที่ 2.5 การทดสอบความซึมน้ำโดยวิธีความดันคงที่
ที่มา: สุทธิศักดิ์ (2559)

ในกรณีที่ใช้ความดันเข้าช่วย

$$h = \frac{P}{\gamma_w}$$

...สมการที่ 11

เมื่อ h = ความต่างของระดับน้ำ , ซม.

P = ความดัน

γ_w = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ = 9,810 นิวตัน/ลูกบาศก์เมตร

จาก

$$K = \frac{QL}{Ah}$$

...สมการที่ 12

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ , ซม.³ / วินาที

L = ความยาวของตัวอย่างดิน , ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน , ซม.²

h = ความต่างของระดับน้ำ , ซม.

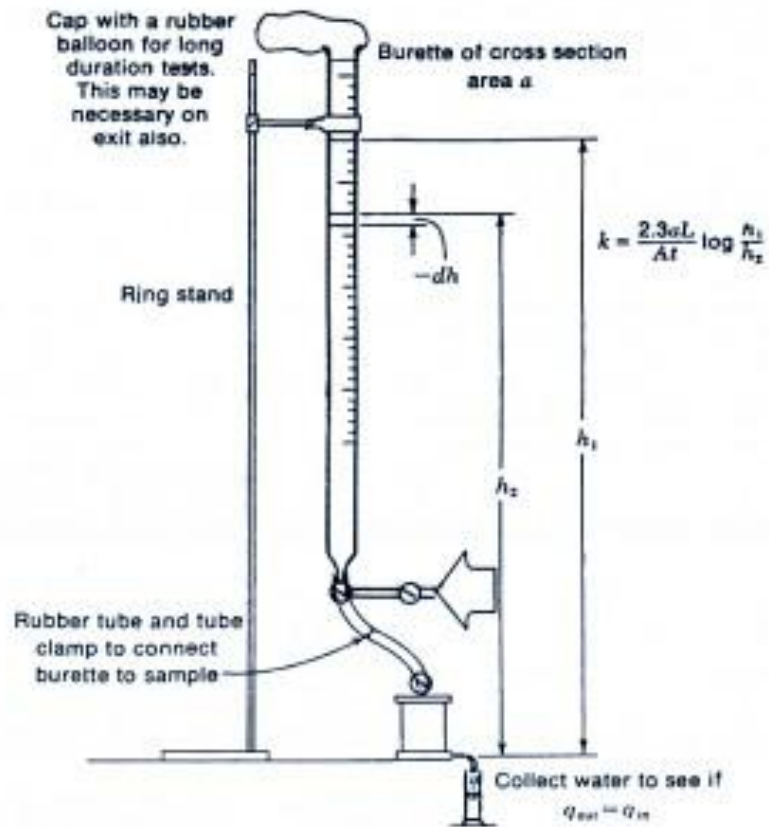
K = ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างดิน

นำสมการที่ 11 แทนในสมการที่ 12

จะได้

$$K = \frac{Q \times L \times \gamma_w}{A \times P}$$

...สมการที่ 13



รูปที่ 2.6 แสดงการทดสอบความซึมน้ำโดยวิธีความดันเปลี่ยน
ที่มา: สุทธิศักดิ์ (2559)

จากสมการ $Q = vA = kiA$

พิจารณาในช่วงเวลาใดๆ

$$q = kiA$$

$$-a \cdot \frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

$$- \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{h} \cdot dh = \frac{Ak}{aL} \cdot \int_0^T dt$$

$$- \ln h \Big|_{h_1}^{h_2} = \frac{Ak}{aL} \cdot t \Big|_0^T$$

$$\ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = \frac{Ak}{aL} \cdot T$$

$$k = \frac{aL}{AT} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

$$k = 2.3 \frac{aL}{AT} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad \dots \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อ a, A = พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้วและตัวอย่างดิน ตามลำดับ, ซม.²

L = ความยาวของตัวอย่างดิน, ซม.

T = เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับน้ำตกจากระดับ h_1 ถึงระดับ h_2 , วินาที

h_1, h_2 = ระดับน้ำเมื่อเริ่มจับเวลาและระดับน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 0 และ T วินาที ตามลำดับ, ซม.

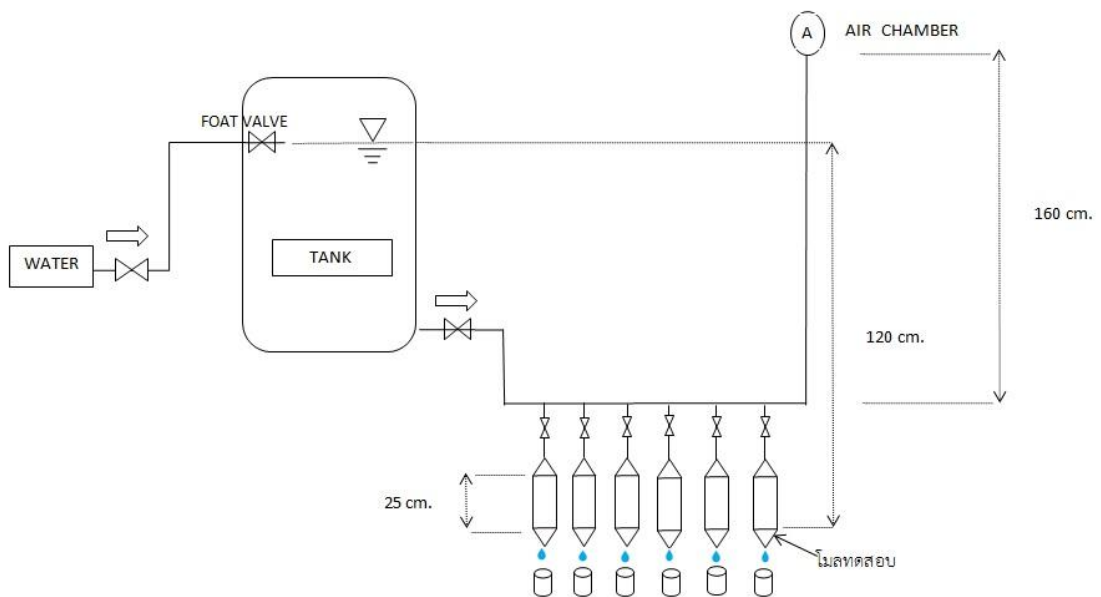
K = ค่าความชื้นน้ำของตัวอย่างดิน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์

การศึกษาเพื่อลดปริมาณการรั่วซึมของน้ำในบ่อดินนี้ ทำโดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ชุดทดสอบแบบ Permeability Test (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย ถังน้ำ 20 ลิตร ติดตั้งที่ความสูง 1.20 เมตรจากชุดทดสอบ ที่ถังน้ำมีการติดตั้งลูกลอย (FOAT VALVE) เพื่อควบคุมระดับน้ำให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ใช้ตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 3.2) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 นิ้ว สูง 25 ซม. มีฝาปิดหัว-ท้ายและท่อสำหรับให้น้ำเข้าและออก ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คือ ดินลูกรัง, เบนโทไนต์ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบแบบ Permeability Test



รูปที่ 3.2 โมลทดสอบ



รูปที่ 3.3 เบนโทไนต์

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาวิธีการลดอัตราการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรังมีวิธีการดังนี้

1. จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ดินลูกรัง และ เบนโทไนด์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ดินลูกรังและเบนโทไนด์

2. นำดินลูกรังที่เตรียมไว้มาตากให้แห้งเพื่อให้ความชื้นในดินเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน
3. นำดินลูกรัง 1 กิโลกรัมมาทำการจำแนกขนาดเม็ดดิน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อหาขนาดของเม็ดดิน โดยเลือกใช้ตะแกรงเบอร์ 1, ¼, 10, 18, 40, 100 และ 200 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การหาขนาดมวลคละของเม็ดดิน

4. เลือกดินลูกรังที่ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 10 , 40 และ 100 มาผสมให้คละกัน เนื่องจากเป็นการกระจายตัวของเม็ดดินที่คละกันดี โดยนำมาผสมในอัตราส่วน 1:1:1 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ดินลูกรังที่ผสมกันแล้ว

5. นำดินลูกรังที่คละกันแล้วมาผสมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนที่ต้องการ ดังตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสมเบนโทไนต์

น้ำหนักของดินลูกรัง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ของเบนโทไนต์ (%)	น้ำหนักของเบนโทไนต์ (กรัม)
6000	1 %	60
6000	2 %	120
6000	3 %	180
6000	4 %	240
6000	5 %	300
6000	6 %	360
6000	7%	420
6000	8 %	480
6000	9 %	540
6000	10 %	600

6. นำดินลูกรัง 6 กิโลกรัมที่คละกันแล้วมาผสมกับเบนโทไนต์ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ดินลูกรังที่ผสมกับเบนโทไนต์

7. ทำการแบ่งตัวอย่างทดลอง เพื่อให้ได้โมลทดสอบที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน 3 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนต์ในแต่ละอัตราส่วน

8. นำดินลูกรังที่ผสมกับเบนโทไนต์จนคละ และดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนต์ บรรจุในโม่ทดสอบ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การบรรจุดินลูกรังที่ผสมกับเบนโทไนต์ ลงในโม่ทดสอบ

9. นำตัวอย่างทดสอบทั้งหมด เข้าประกอบกับชุดทดสอบแบบ Permeability Test จากนั้นเปิดน้ำให้ไหลผ่านโม่ทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ และทำการวัดอัตราการซึมทุกๆ 24 ชั่วโมง โดยใช้ระยะเวลา 10 นาทีในการวัดอัตราการซึม ดังรูปที่ 3.10



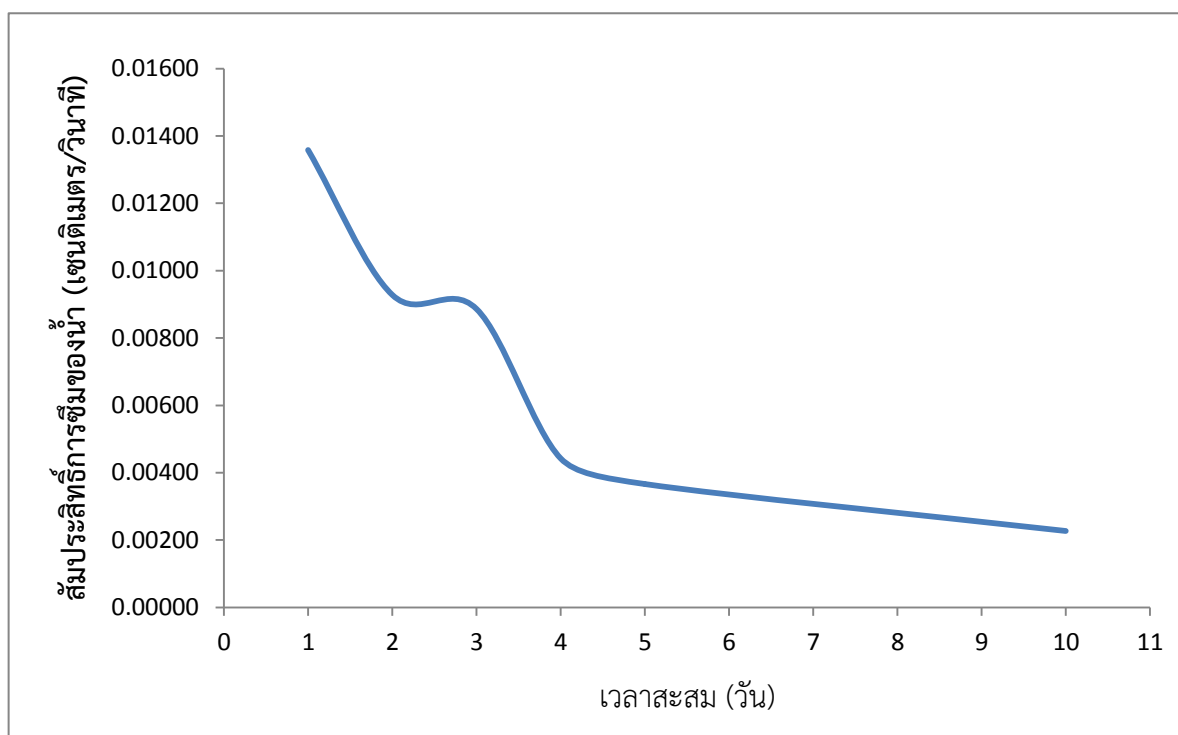
รูปที่ 3.10 นำโม่ทดสอบประกอบเข้ากับชุดทดสอบแบบ Permeability Test

บทที่ 4

ผลการศึกษาทดลอง

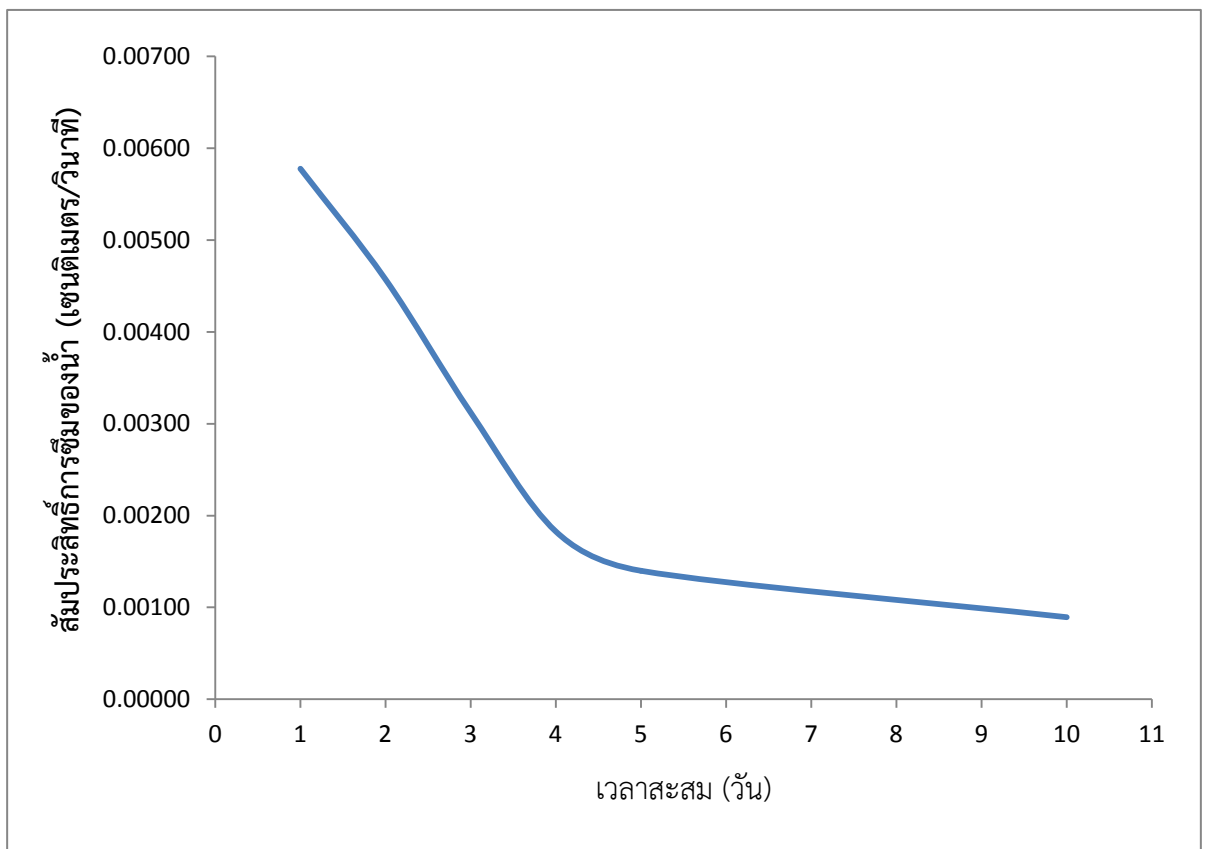
4.1 ผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองที่ได้ทำการศึกษาความสามารถของเบนโทไนต์ในการลดอัตราการซึมผ่านของน้ำ โดยการหาอัตราการซึมของน้ำที่ซึมผ่านตัวอย่างทดลองทั้ง 10 ตัวอย่าง โดยทำการวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำในแต่ละตัวอย่างทดลองทุกๆ 24 ชั่วโมง ได้ผลดังต่อไปนี้



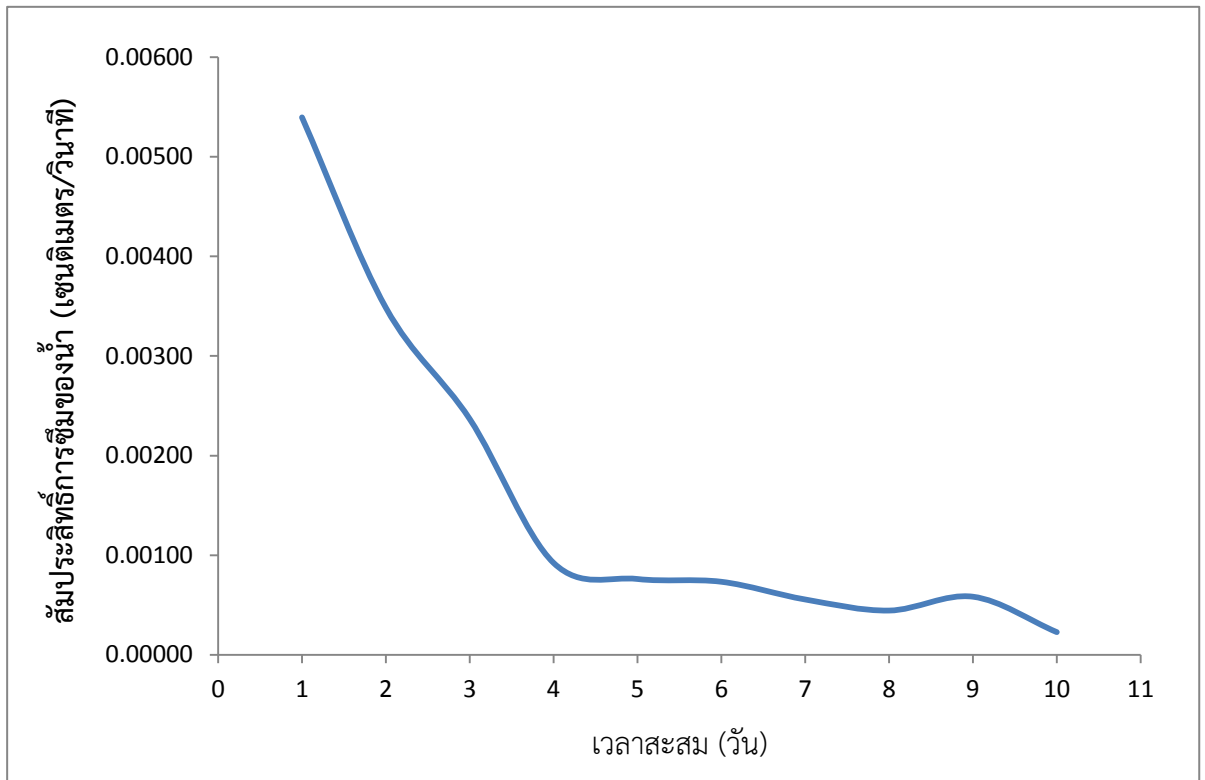
รูปที่ 4.1 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 1%

จากกราฟที่ 4.1 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 1% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0136 เซนติเมตร/วินาทีและวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0023 เซนติเมตร/วินาที



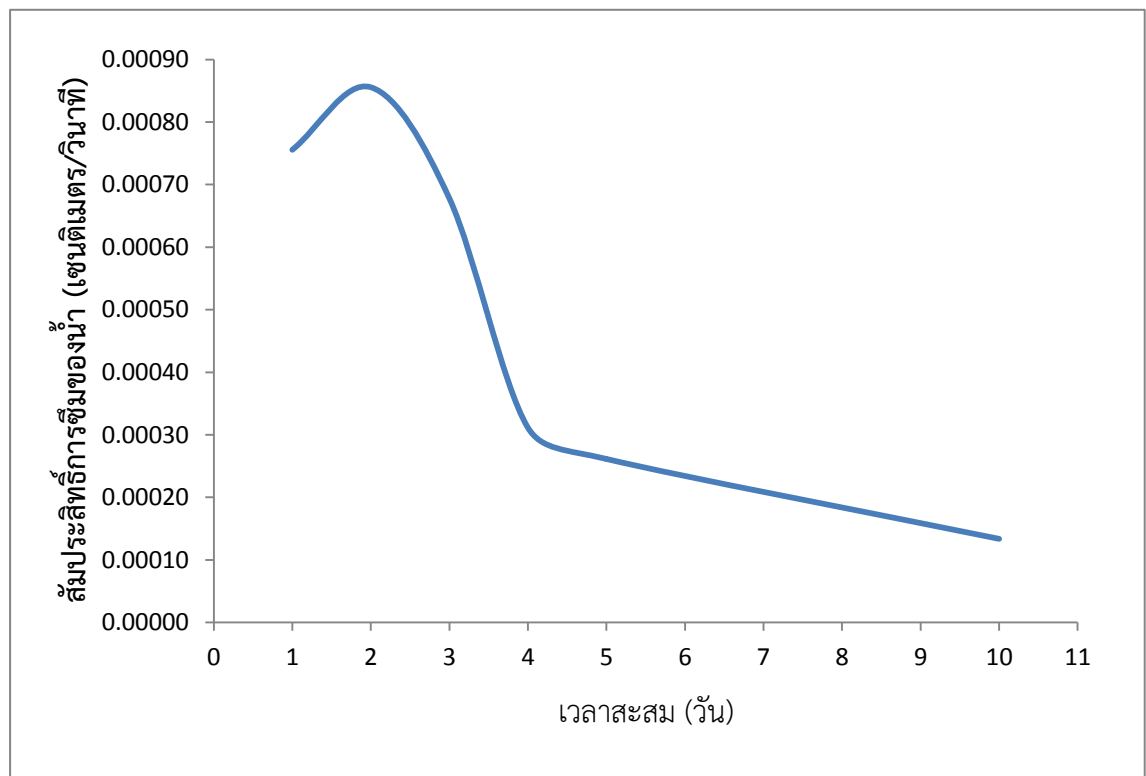
รูปที่ 4.2 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 2%

จากกราฟที่ 4.2 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 2% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0058 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0009 เซนติเมตร/วินาที



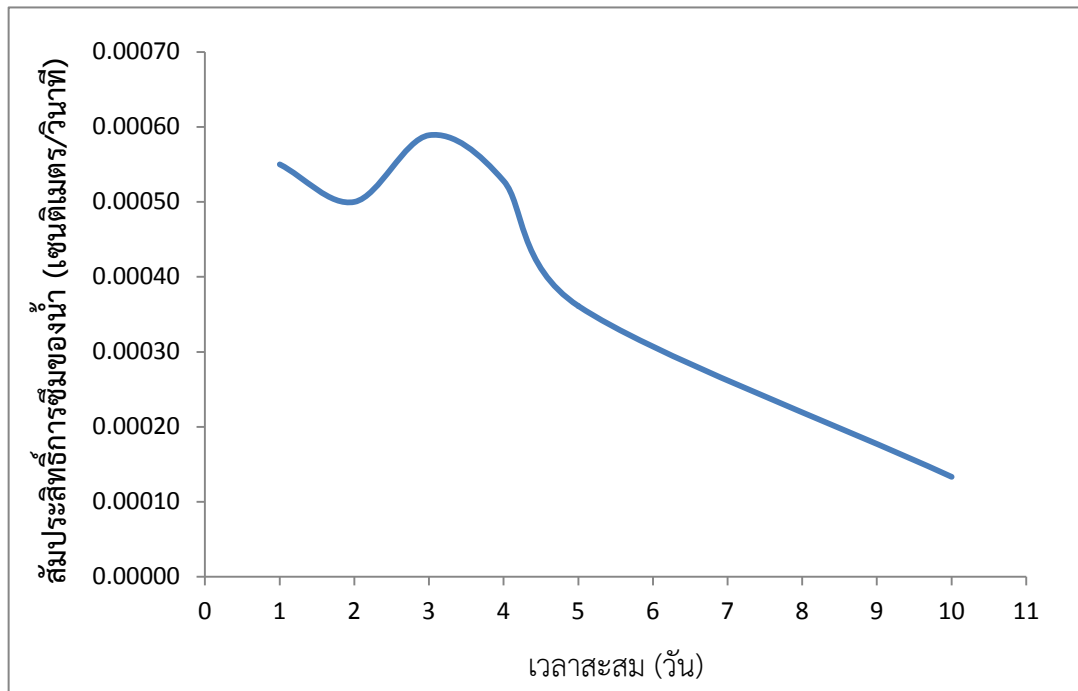
รูปที่ 4.3 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 3 %

จากกราฟที่ 4.3 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 3% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0054 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0002 เซนติเมตร/วินาที



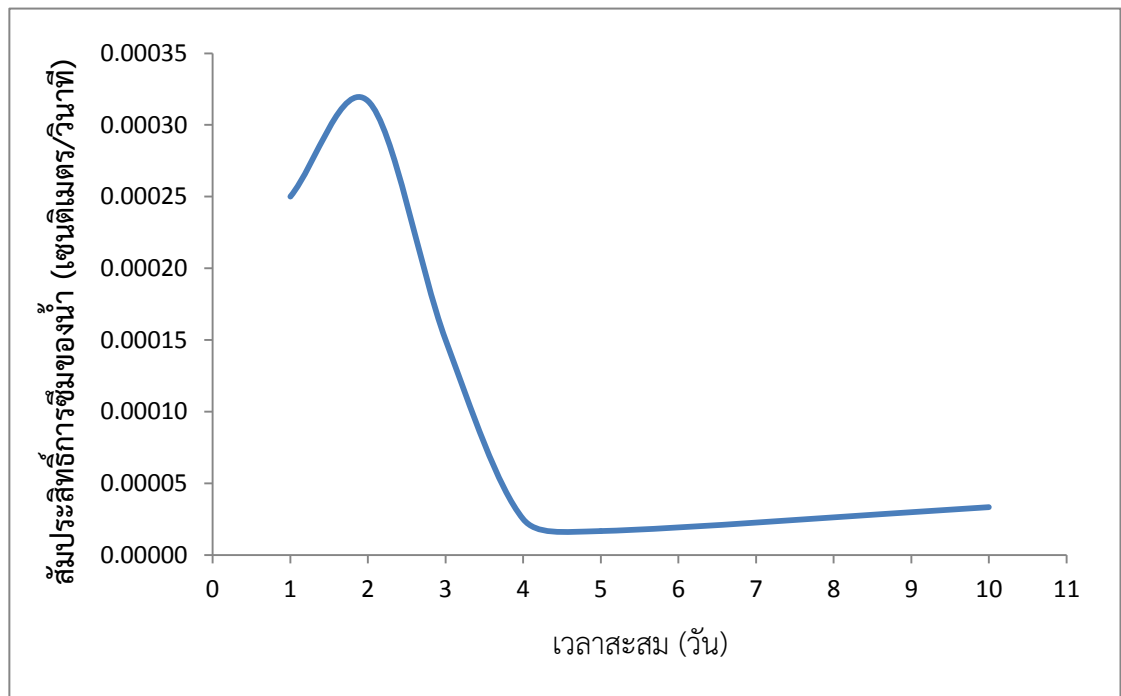
รูปที่ 4.4 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 4 %

จากกราฟที่ 4.4 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 4% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.00076 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.00013 เซนติเมตร/วินาที



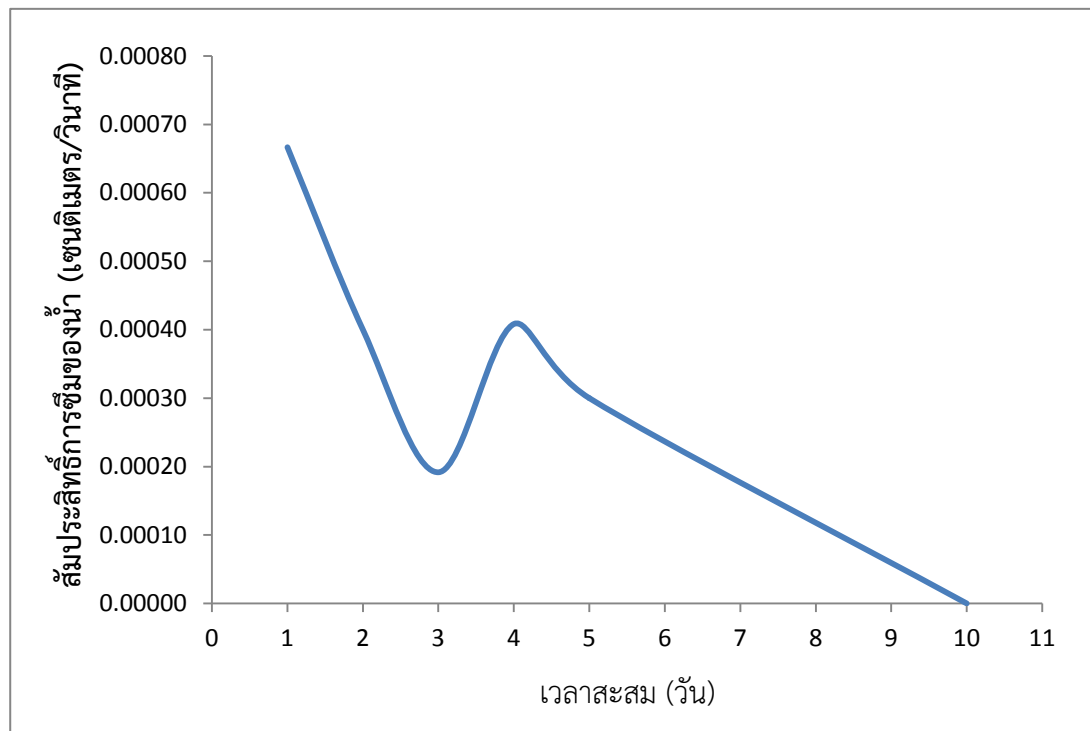
รูปที่ 4.5 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 5%

จากกราฟที่ 4.5 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 5% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.00055 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.00013 เซนติเมตร/วินาที



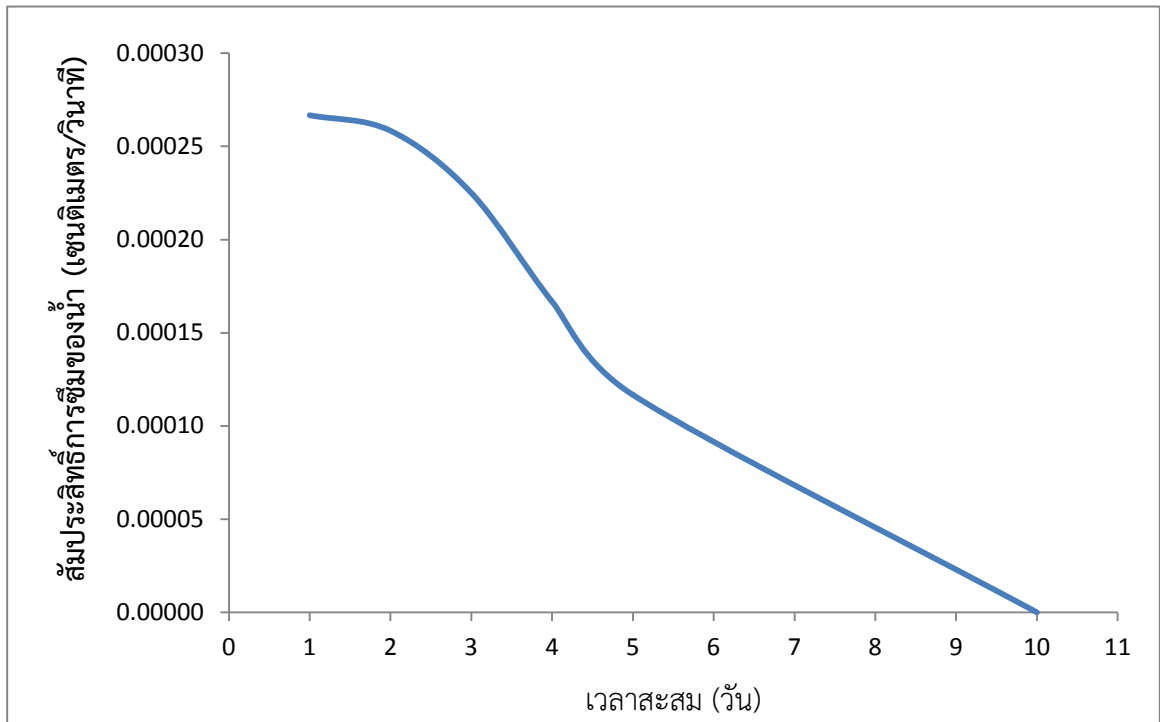
รูปที่ 4.6 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 6%

จากกราฟที่ 4.6 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 6% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.0025 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.000033 เซนติเมตร/วินาที



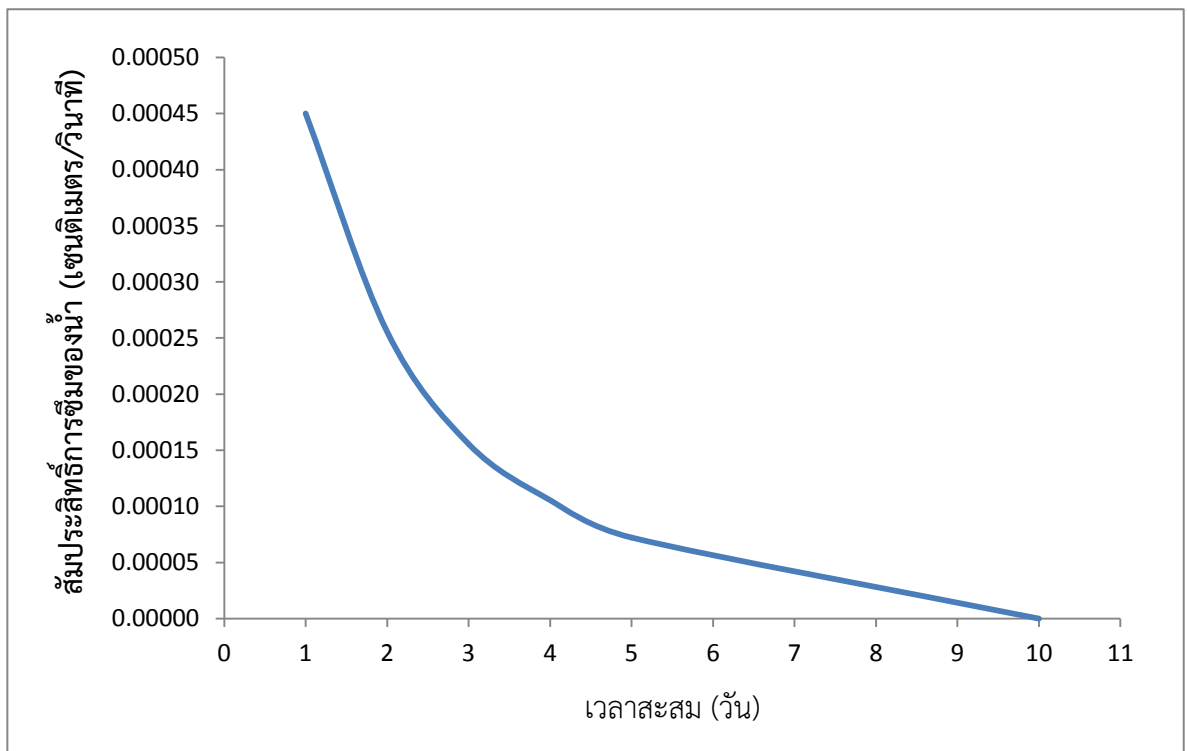
รูปที่ 4.7 อัตราการซึมน้ำของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 7%

จากกราฟที่ 4.7 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 7% มีอัตราการซึมน้ำสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมน้ำ 0.000667 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่าไม่มีอัตราการซึมน้ำ



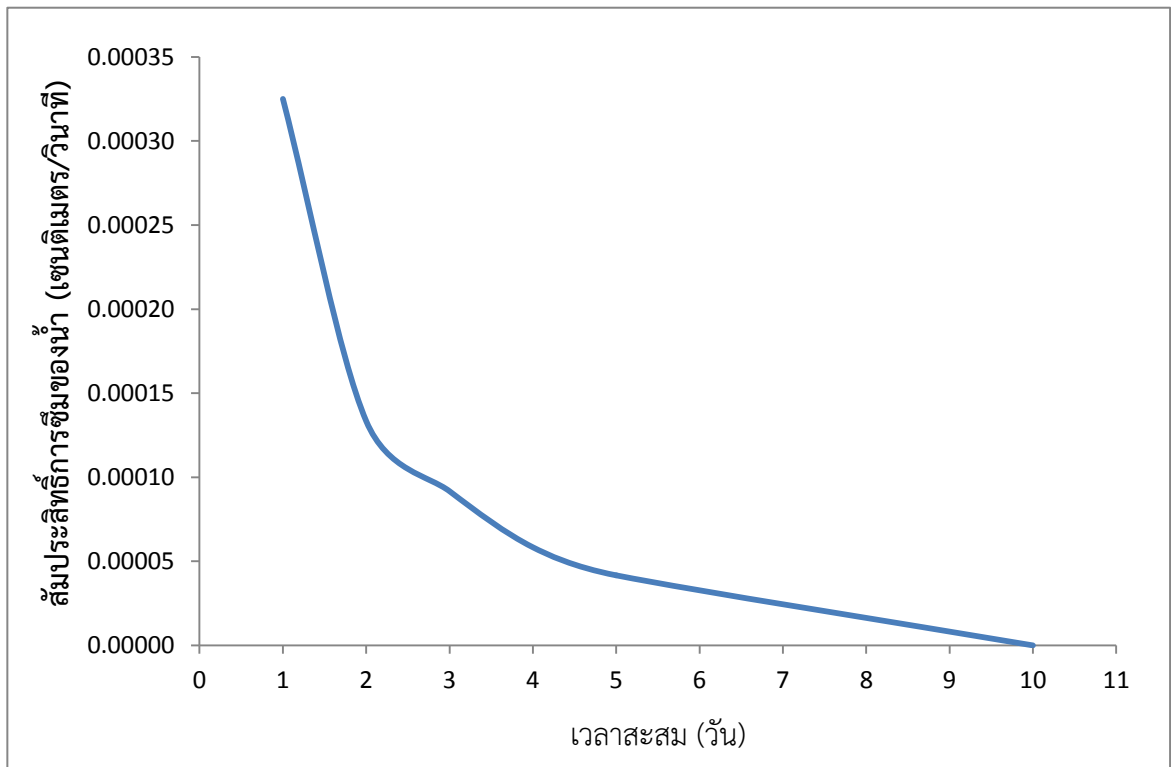
รูปที่ 4.8 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 8%

จากกราฟที่ 4.8 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 8% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.000267 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่าไม่มีอัตราการซึม



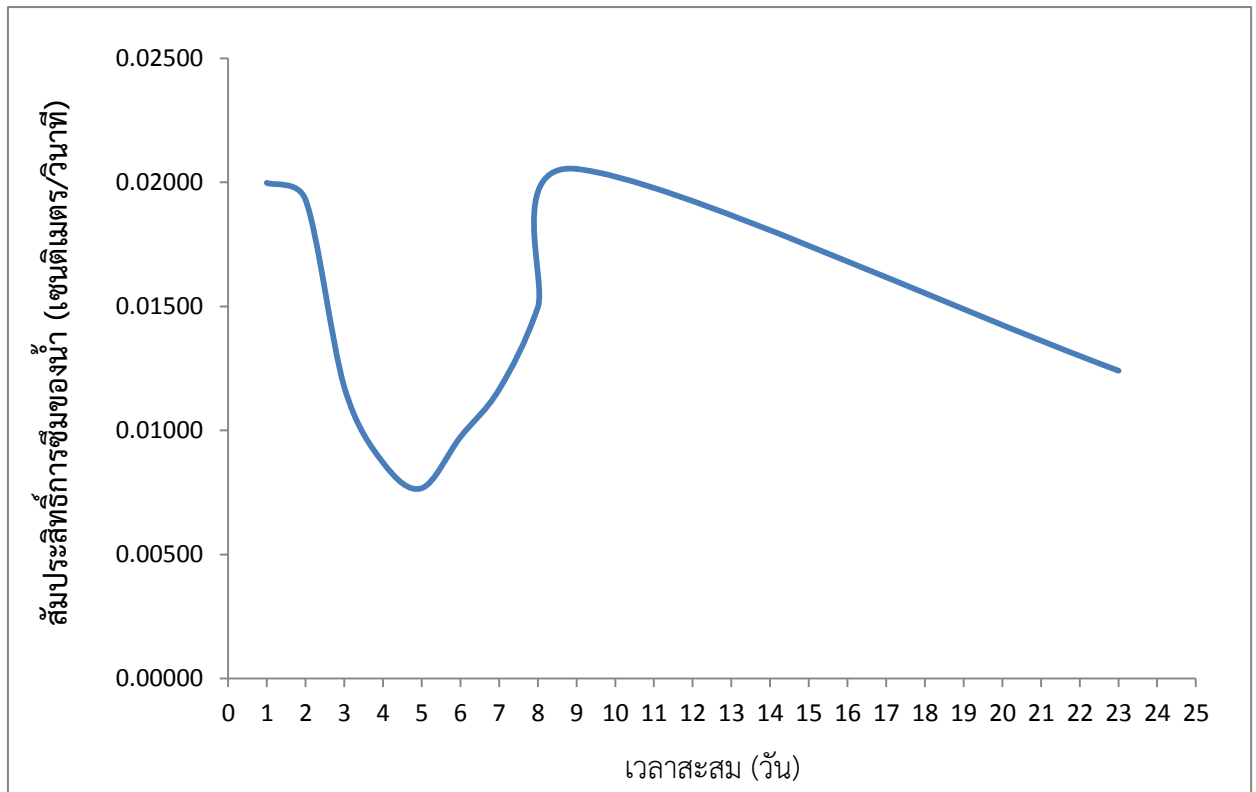
รูปที่ 4.9 อัตราการซึมน้ำของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 9%

จากกราฟที่ 4.9 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 9% มีอัตราการซึมน้ำสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมน้ำ 0.00045 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่าไม่มีอัตราการซึมน้ำ



รูปที่ 4.10 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 10%

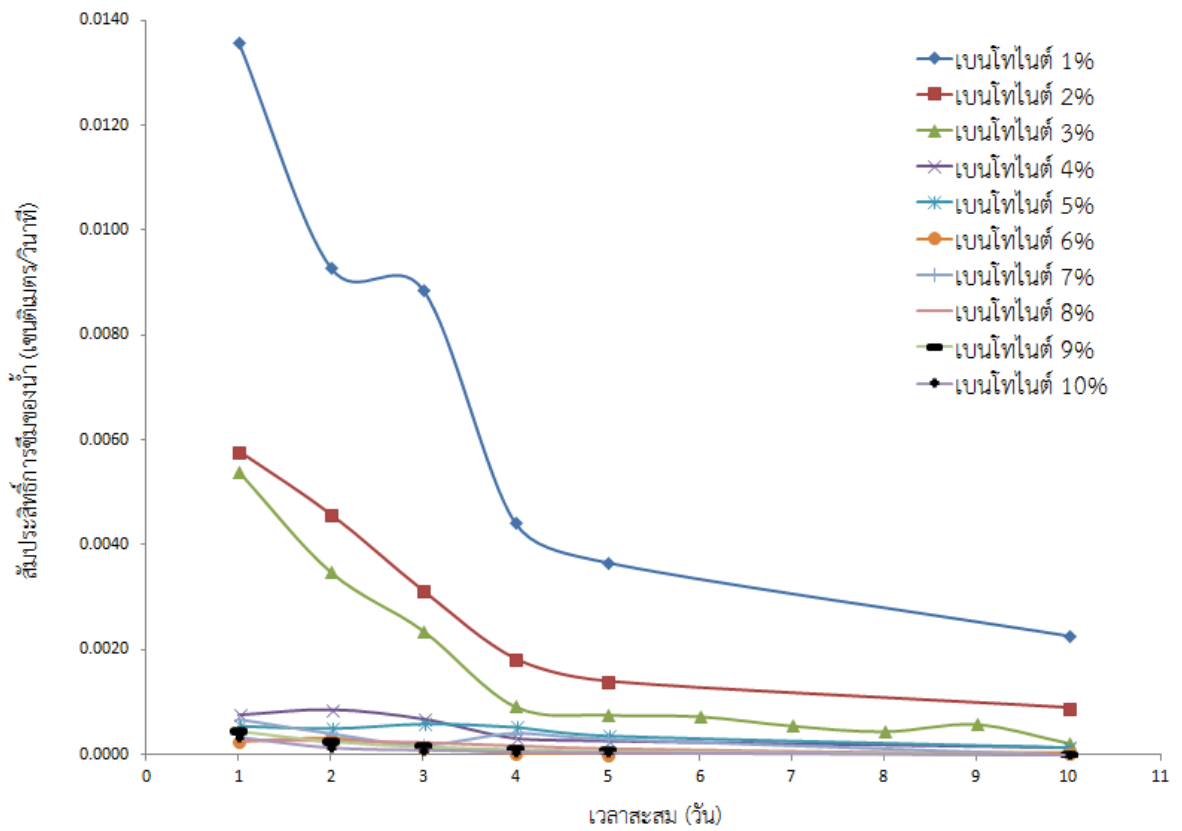
จากกราฟที่ 4.10 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 10% มีอัตราการซึมสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.000325 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 10 พบว่าไม่มีอัตราการซึม



รูปที่ 4.11 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์

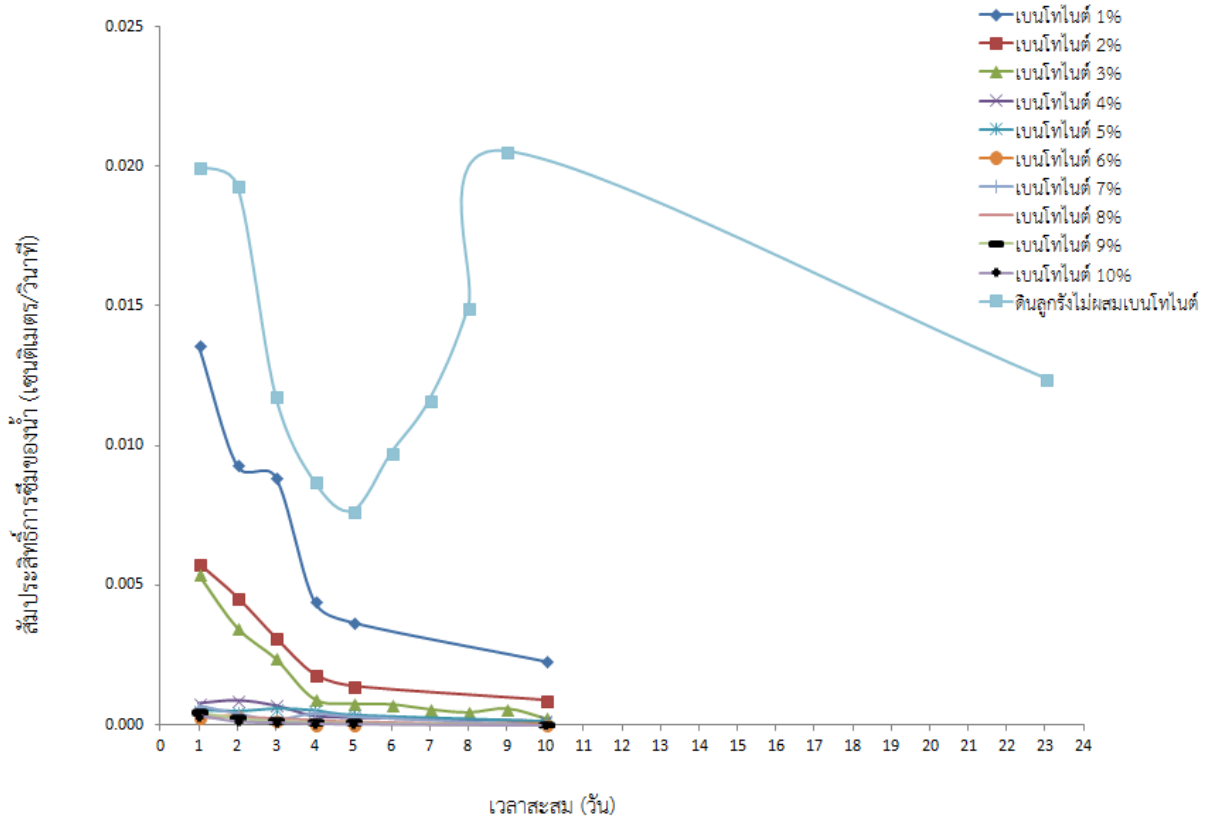
จากกราฟที่ 4.11 พบว่าเมื่อเริ่มเปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ อัตราการซึมของน้ำในดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์ มีอัตราการซึมสูง และมีค่าอัตราการซึมลดลงอย่างช้าๆ โดยวันที่ 1 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.02 เซนติเมตร/วินาที และวันที่ 23 พบว่ามีอัตราการซึมเฉลี่ย 0.012 เซนติเมตร/วินาที

นำค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองที่ผสมเบนโทไนด์ทั้งหมดมาสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยในช่วง 1-10 วัน ดังรูปที่ 4.12 และนำค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองที่ผสมเบนโทไนด์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดลองที่ไม่ผสมเบนโทไนด์ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองที่ผสมเบนโทไนด์ ในช่วง 1-10 วัน

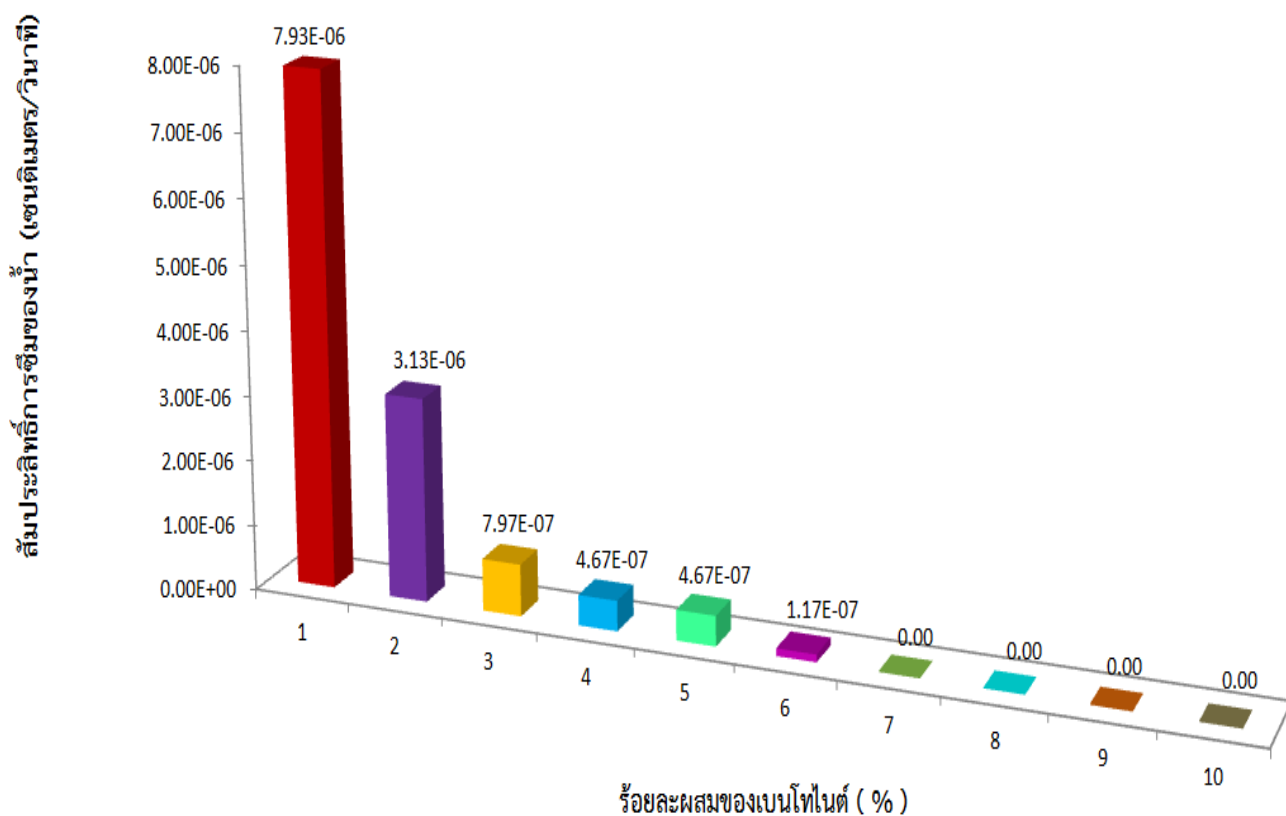
จากรูปที่ 4.12 อัตราการซึมเฉลี่ยของดินที่ผสมเบนโทไนด์ 1% มีค่าอัตราการซึมสูงที่สุดและอัตราการซึมเฉลี่ยของดินที่ผสมเบนโทไนด์ 10% มีค่าอัตราการซึมต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.39×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที และไม่มีอัตราการซึม ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยของตัวอย่างทดลองทั้งหมด

จากรูปที่ 4.13 ค่าอัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์ มีค่าอัตราการซึมสูงมากเมื่อเทียบกับดินลูกรังที่มีการผสมเบนโทไนด์ โดยมีค่าเท่ากับ 7.63×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที โดยในช่วง 5 วันแรก มีค่าอัตราการซึมสูงและลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเข้าวันที่ 6 อัตราการซึมก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเข้าวันที่ 10 อัตราการซึมก็ไม่เพิ่มขึ้นอีก และเริ่มมีค่าลดลงอย่างช้าๆ แม้จะผ่านไป 23 วัน ก็ยังสามารถวัดค่าอัตราการซึมได้

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราการซึมเฉลี่ยของดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์ มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนด์ โดยดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนด์ มีค่าอัตราการซึมที่ลดลงและคงที่ในเวลาอันรวดเร็ว ต่างจากดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนด์ ซึ่งมีค่าอัตราการซึมที่ลดลงอย่างช้าๆ และใช้ระยะเวลาเวลานานกว่าที่ค่าอัตราการซึมจะเริ่มคงที่



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบอัตราการซึมเฉลี่ยในวันที่ 10

จากกราฟที่ 4.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในวันที่ 10 ของตัวอย่างทดลองทั้งหมด จากกราฟชี้ให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดลงเมื่อปริมาณของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของดินลูกรังที่ผสมเบนโทไนต์ในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ,K (เซนติเมตร/วินาที)
เบนโทไนต์ 1 %	7.93×10^{-6}
เบนโทไนต์ 2 %	3.13×10^{-6}
เบนโทไนต์ 3 %	7.97×10^{-7}
เบนโทไนต์ 4 %	4.67×10^{-7}
เบนโทไนต์ 5 %	4.67×10^{-7}
เบนโทไนต์ 6 %	1.17×10^{-7}
เบนโทไนต์ 7 %	0
เบนโทไนต์ 8 %	0
เบนโทไนต์ 9 %	0
เบนโทไนต์ 10 %	0

จากกราฟข้อมูลการทดลองทั้งหมดจะเห็นว่าในช่วง 4 วันแรก ค่าอัตราการซึมจะไม่คงที่ เนื่องจากดินในกระบอกยังไม่มีการจัดเรียงตัวที่ดีและอากาศที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อันเป็นอุปสรรคในการซึมผ่านของน้ำ ทำให้อัตราการซึมมีค่าลดลง และสาเหตุที่ค่าอัตราการซึมมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดจากอากาศที่กระจายอยู่ภายในเม็ดดินหลุดออกไปกับน้ำ ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย และทำให้อัตราการซึมมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ค่าอัตราการซึมจะลดลงเรื่อยๆ จนค่าอัตราการซึมเริ่มคงที่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังด้วยการใช้โซเดียมเบนโทไนด์ เพื่อหาอัตราส่วนผสมเบนโทไนด์ที่เหมาะสม เพื่อเป็นข้อมูลการนำไปใช้ประโยชน์จากการรั่วซึมของบ่อน้ำและบ่อขยะ

การศึกษาได้นำดินลูกรังมาผสมกับเบนโทไนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 1,2,3,4,5,6,7,8,9 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง การทดลองชี้ให้เห็นว่า หากเพิ่มปริมาณร้อยละของเบนโทไนด์ จะทำให้อัตราการซึมผ่านได้ของน้ำลดลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน อัตราการซึมจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยอัตราการซึมของดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ 7.93×10^{-6} เซนติเมตร/วินาที ดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 2 มีค่าเท่ากับ 3.13×10^{-6} เซนติเมตร/วินาที ดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 3 มีค่าเท่ากับ 7.97×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที ดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 4 มีค่าเท่ากับ 4.67×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที ดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 4.67×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที ดินลูกรังกับเบนโทไนด์ร้อยละ 6 มีค่าเท่ากับ 1.17×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที และพบว่าไม่มีอัตราการซึม เมื่อผสมเบนโทไนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 7-10 โดยน้ำหนักแห้ง

จากข้อมูลกองสำรวจและจำแนกดิน พ.ศ. 2545 กำหนดให้ชั้นดินกันซึมสำหรับการก่อสร้างบ่อน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-6} เซนติเมตร/วินาที การทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้เบนโทไนด์ในการป้องกันการรั่วซึมของบ่อน้ำ ต้องใช้เบนโทไนด์อย่างน้อยในอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง และจากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ พ.ศ. 2541 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตร/วินาที สำหรับบ่อขยะ การทดลองชี้ให้เห็นว่า การใช้เบนโทไนด์ในการป้องกันการรั่วซึมของบ่อขยะ ต้องใช้เบนโทไนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 7 ขึ้นไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปลี่ยนขนาดของเม็ดดิน โดยใช้ดินที่มีขนาดของเม็ดดินที่คละกันไม่ดีมาทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับดินที่มีขนาดเม็ดดินคละกันดี
2. ควรศึกษาผลการทดลองโดยใช้ดินที่ได้รับการบดอัด ในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองโดยใช้ดินที่ไม่ได้บดอัด เนื่องจากข้อจำกัดของเวลา
3. ในการทดลองควรจะทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนความสูงของถังน้ำในชุดทดสอบแบบ Permeability Test
4. ควรศึกษาวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ช่วยลดอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำ เนื่องจากเบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดลองหาซื้อได้ยาก

เอกสารอ้างอิง

AMCOL International (Thailand) Ltd. (2550). แร่เบนโทไนต์คืออะไร. Retrieved กรกฎาคม 18, 2559, from <http://www.amcolmineralsasia.com/APPLICATIONS-PRODUCTS/Construction>

คณะกรรมการกำหนดมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ และการจัดการที่ดิน. (1984). การจัดการดินลูกรัง. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

บริษัท เทพเกษตร อุตสาหกรรม จำกัด. (2554). โซเดียมเบนโทไนต์กับอุตสาหกรรม. Retrieved มิถุนายน 3, 2559, from <http://www.siliconclay.com/sodiumbentonite.html>

ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, รศ.ดร.วรารกร ไม้เรียง, และรศ.ประทีป ดวงเดือน. (n.d.). การหาขนาดเม็ดดิน. Retrieved กรกฎาคม 10, 2559, from <http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch06/ch006.htm>

ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ และคณะ. (n.d.). Soil Permeability Test. Retrieved กรกฎาคม 10, 2559, from <http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch11/ch011.htm>

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. (2544). ดินลูกรัง. กรุงเทพมหานคร: อรุณการพิมพ์.

สถาพร คูวิจิตรจากรุ. (2546). ทดลองปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: ไลบราirie นาย พับลิชชิง.

อ.ดร.สรินทร์ ลิ้มปนาท. (2544). ประโยชน์ของเบนโทไนต์. Retrieved กรกฎาคม 12, 2559, from <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/June/radio6-2.htm>

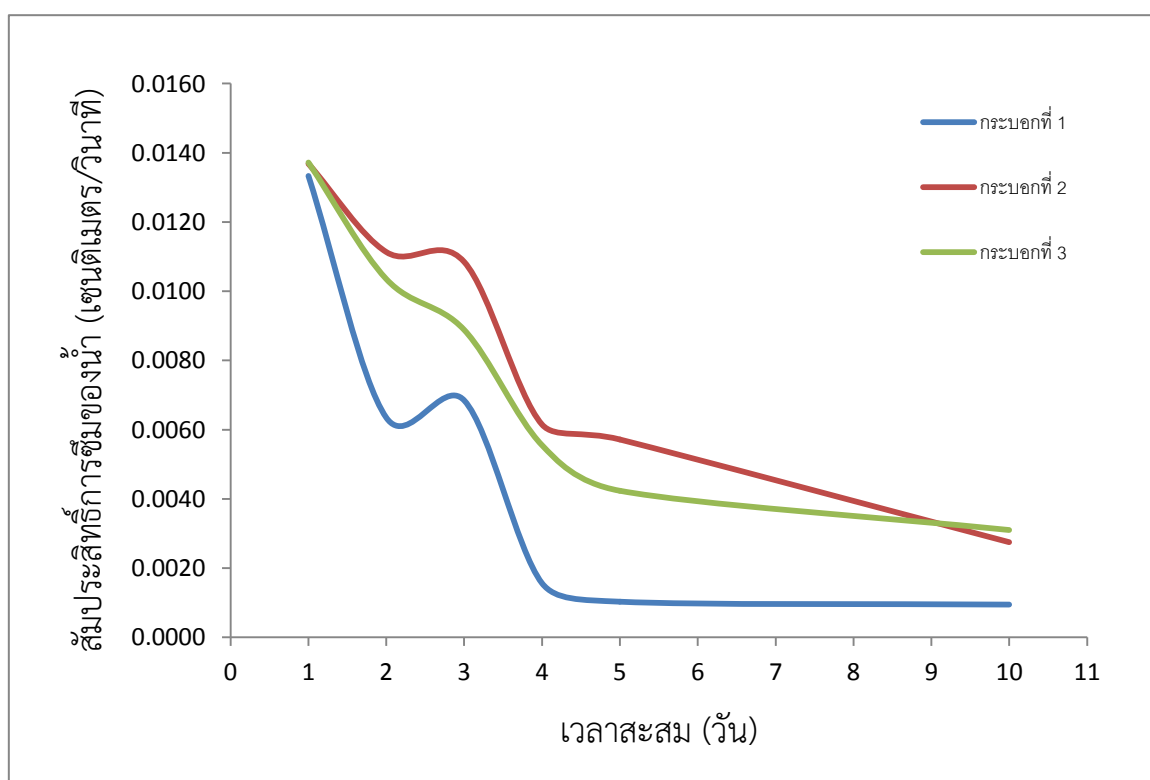
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางและกราฟอัตราการผลิตของตัวอย่างทดลองแต่ละกระบอก

ตารางภาคผนวกที่ 1 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 1

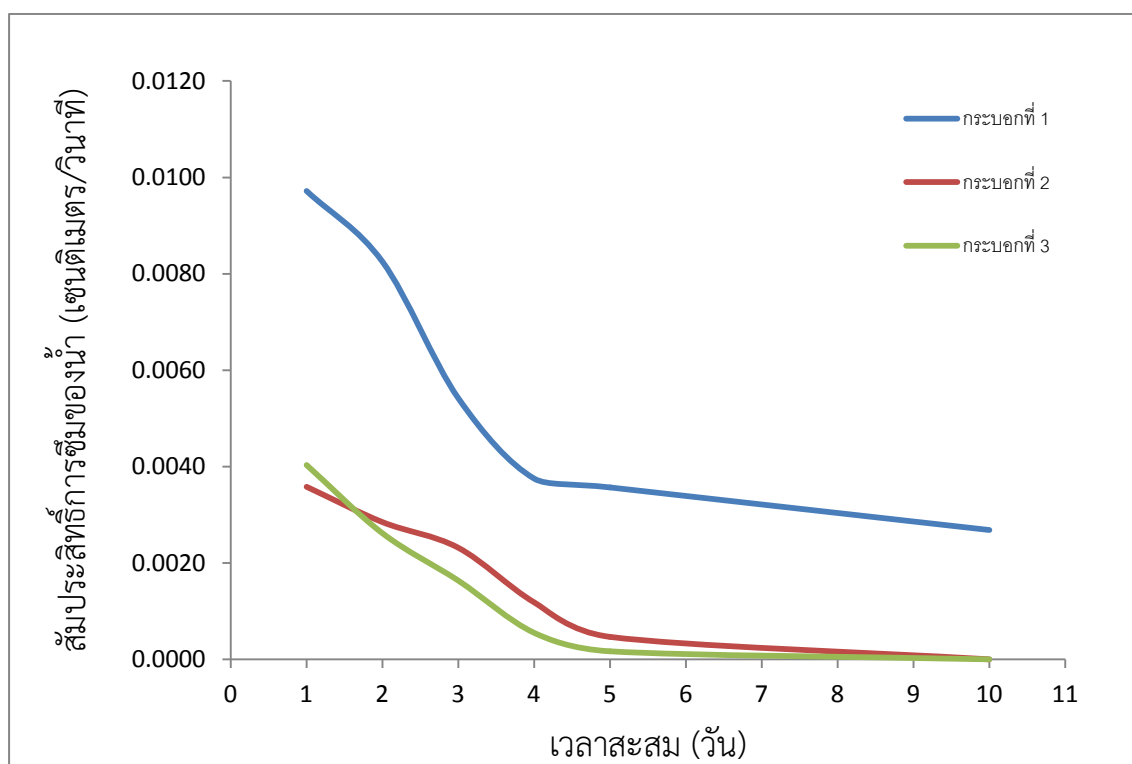
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 1			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0133	0.0137	0.0137	0.0136
2	0.0064	0.0111	0.0104	0.0093
3	0.0069	0.0109	0.0089	0.0089
4	0.0016	0.0062	0.0056	0.0044
5	0.0010	0.0057	0.0042	0.0037
10	0.0010	0.0028	0.0031	0.0023



รูปภาคผนวกที่ 1 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 1%

ตารางภาคผนวกที่ 2 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 2

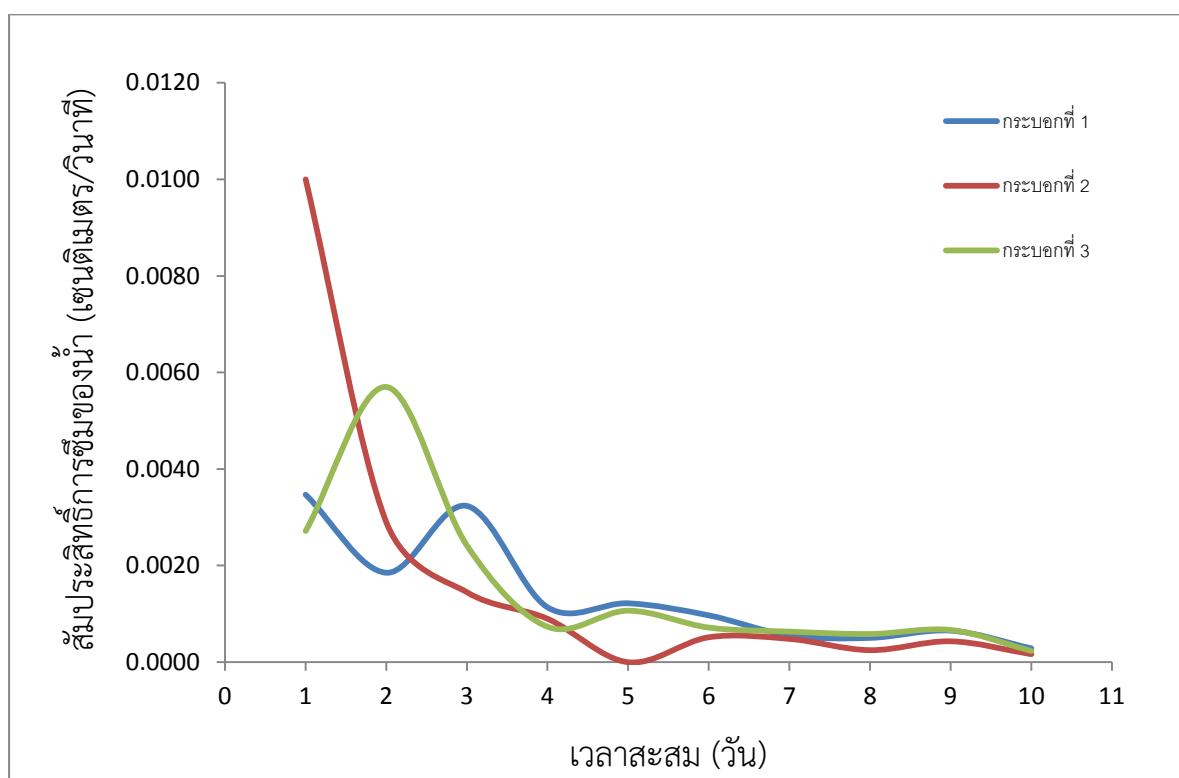
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 2			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0097	0.0036	0.0040	0.0058
2	0.0083	0.0029	0.0026	0.0046
3	0.0054	0.0023	0.0016	0.0031
4	0.0038	0.0012	0.0005	0.0018
5	0.0036	0.0005	0.0002	0.0014
10	0.0027	0.0000	0.0000	0.0009



รูปภาคผนวกที่ 2 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 2%

ตารางภาคผนวกที่ 3 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 3

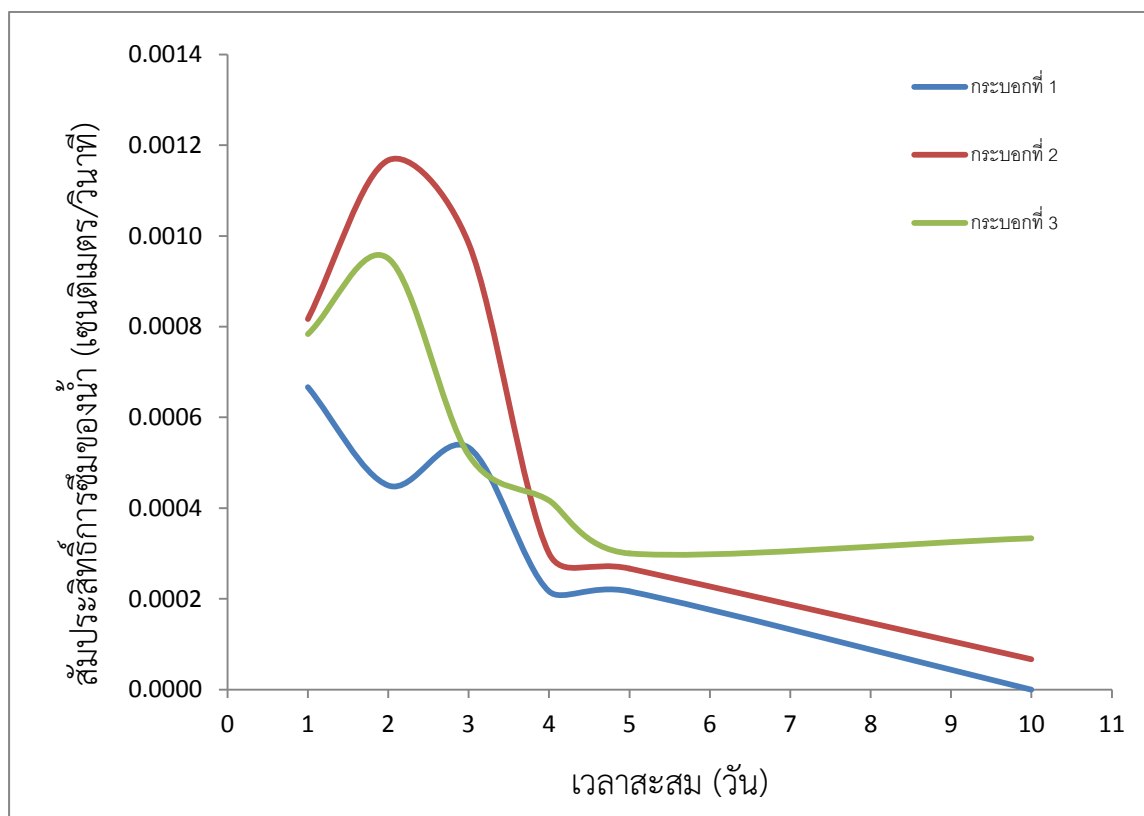
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 3			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0035	0.0100	0.0027	0.0054
2	0.0019	0.0029	0.0057	0.0035
3	0.0032	0.0015	0.0024	0.0024
4	0.0011	0.0009	0.0007	0.0009
5	0.0012	0.0000	0.0011	0.0008
6	0.0010	0.0005	0.0007	0.0007
7	0.001	0.000	0.001	0.001
8	0.001	0.000	0.001	0.000
9	0.001	0.000	0.001	0.001
10	0.000	0.000	0.000	0.000



รูปภาคผนวกที่ 3 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 3%

ตารางภาคผนวกที่ 4 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 4

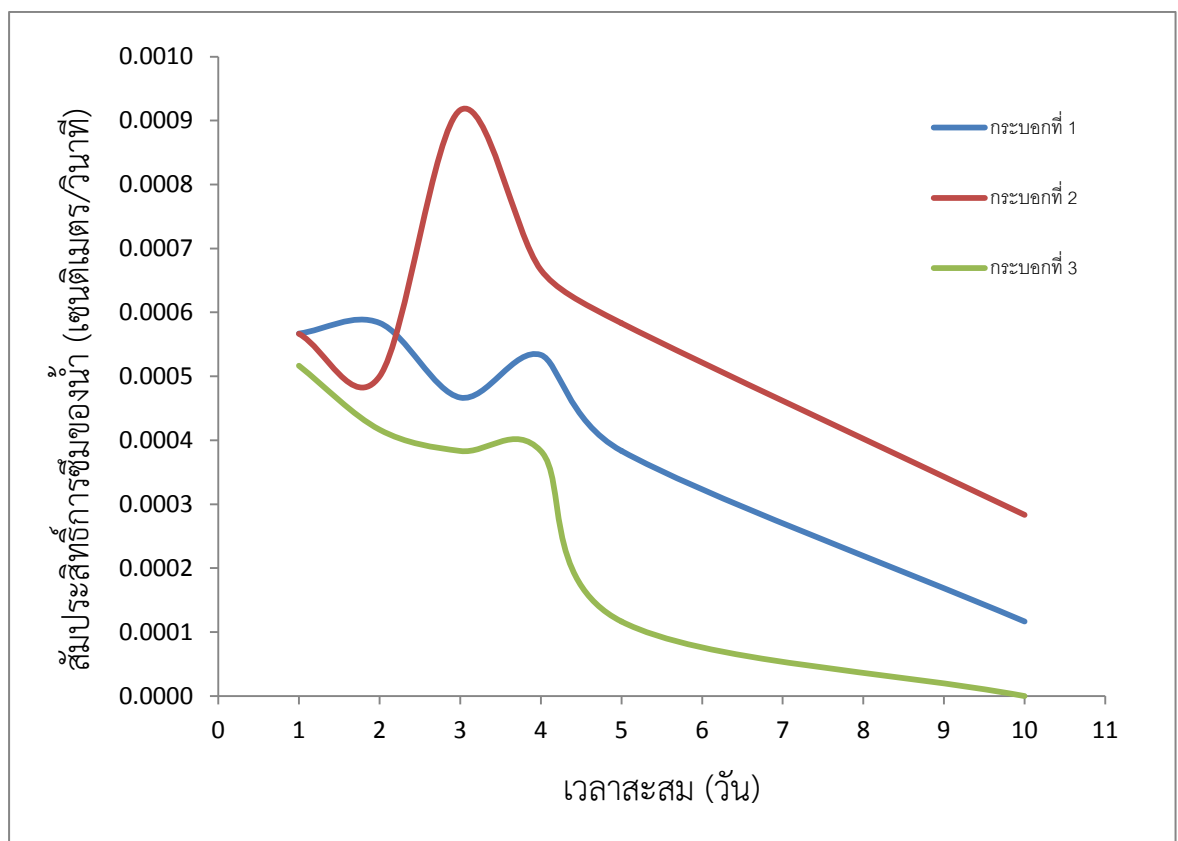
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 4			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	6.67E-04	8.17E-04	7.83E-04	7.56E-04
2	4.50E-04	1.17E-03	9.50E-04	8.56E-04
3	5.33E-04	9.83E-04	5.17E-04	6.78E-04
4	2.17E-04	3.00E-04	4.17E-04	3.11E-04
5	2.17E-04	2.67E-04	3.00E-04	2.61E-04
10	0.00E+00	6.67E-05	3.33E-04	1.33E-04



รูปภาคผนวกที่ 4 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 4%

ตารางภาคผนวกที่ 5 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 5

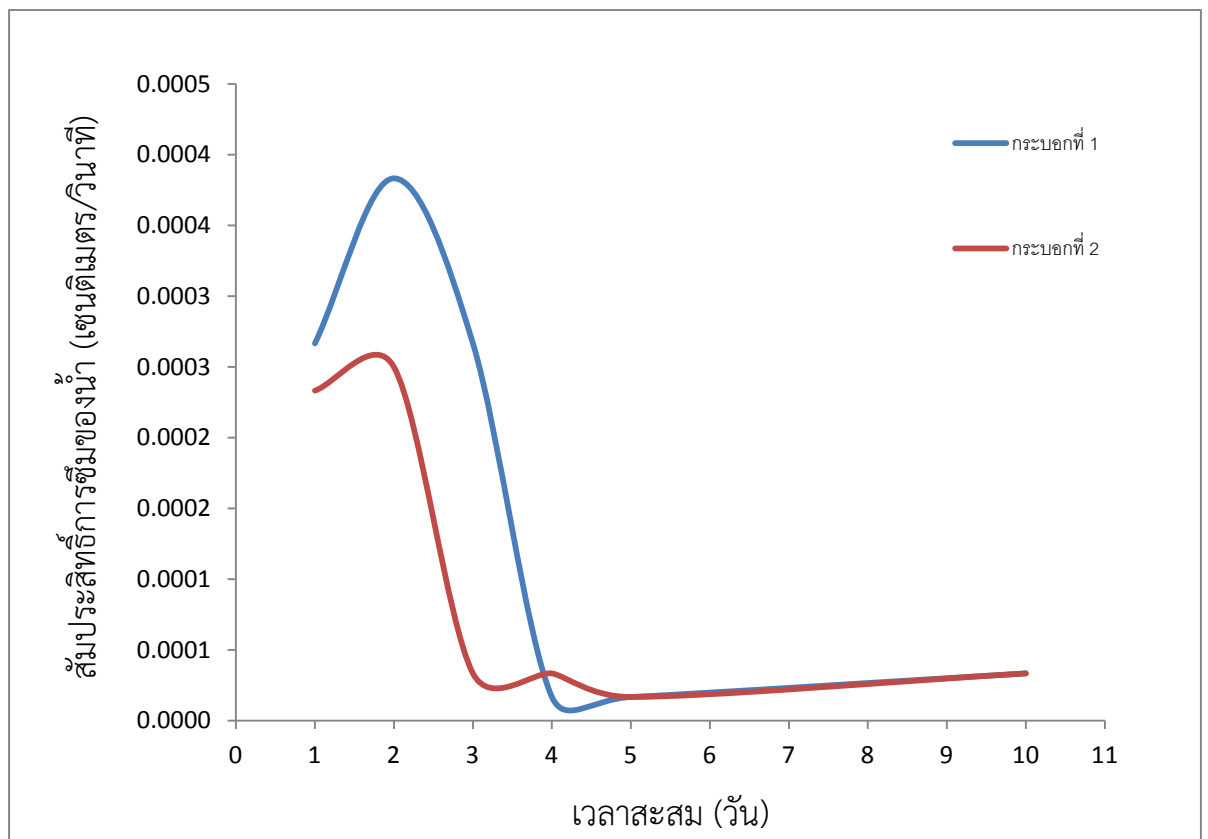
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 5			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	5.67E-04	5.67E-04	5.17E-04	5.50E-04
2	5.83E-04	5.00E-04	4.17E-04	5.00E-04
3	4.67E-04	9.17E-04	3.83E-04	5.89E-04
4	5.33E-04	6.67E-04	3.83E-04	5.28E-04
5	3.83E-04	5.83E-04	1.17E-04	3.61E-04
10	1.17E-04	2.83E-04	0.00E+00	1.33E-04



รูปภาคผนวกที่ 5 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 5%

ตารางภาคผนวกที่ 6 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 6

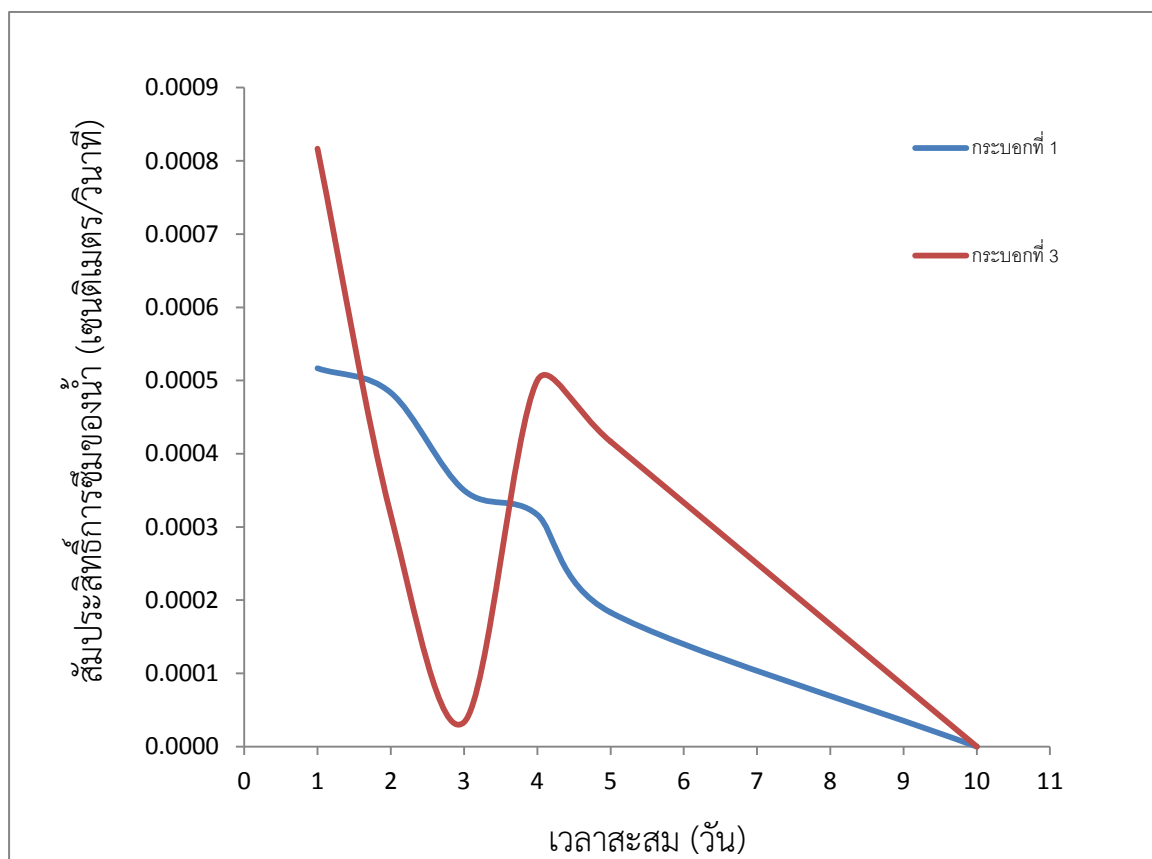
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 6			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	2.67E-04	2.33E-04		2.50E-04
2	3.83E-04	2.50E-04		3.17E-04
3	2.67E-04	3.33E-05		1.50E-04
4	1.67E-05	3.33E-05		2.50E-05
5	1.67E-05	1.67E-05		1.67E-05
10	3.33E-05	3.33E-05		3.33E-05



รูปภาคผนวกที่ 6 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 6%

ตารางภาคผนวกที่ 7 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 7

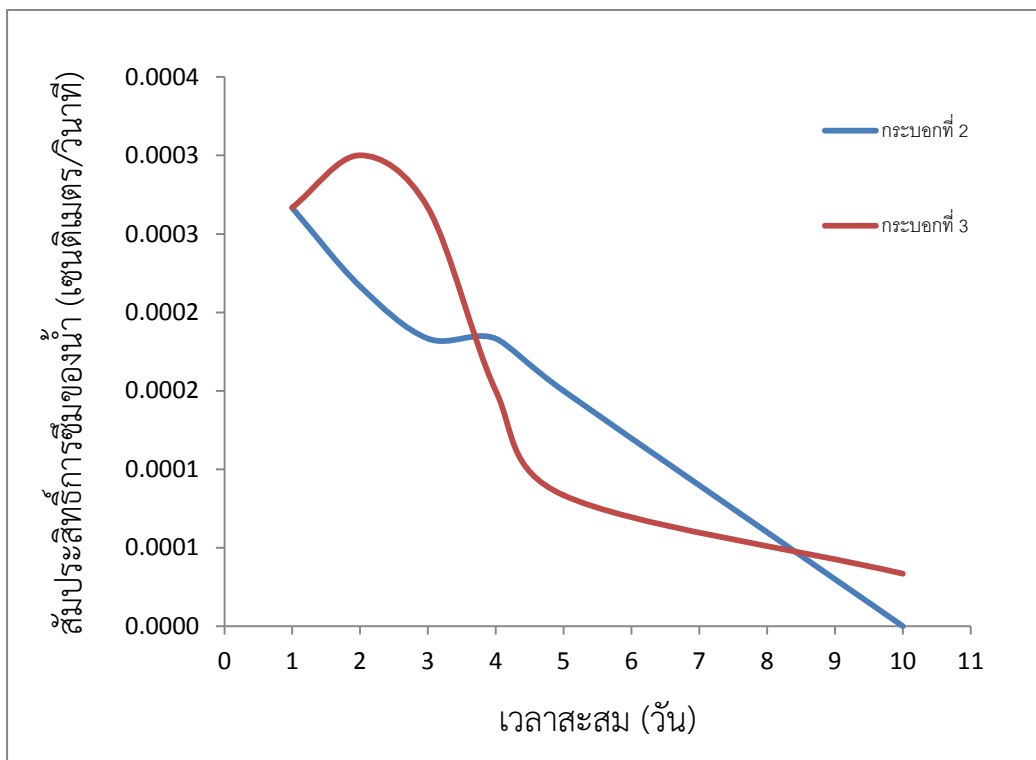
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 7			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	5.17E-04		8.17E-04	6.67E-04
2	4.83E-04		3.17E-04	4.00E-04
3	3.50E-04		3.33E-05	1.92E-04
4	3.17E-04		5.00E-04	4.08E-04
5	1.83E-04		4.17E-04	3.00E-04
10	0.00		0.00	0.00



รูปภาคผนวกที่ 7 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 7%

ตารางภาคผนวกที่ 8 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 8

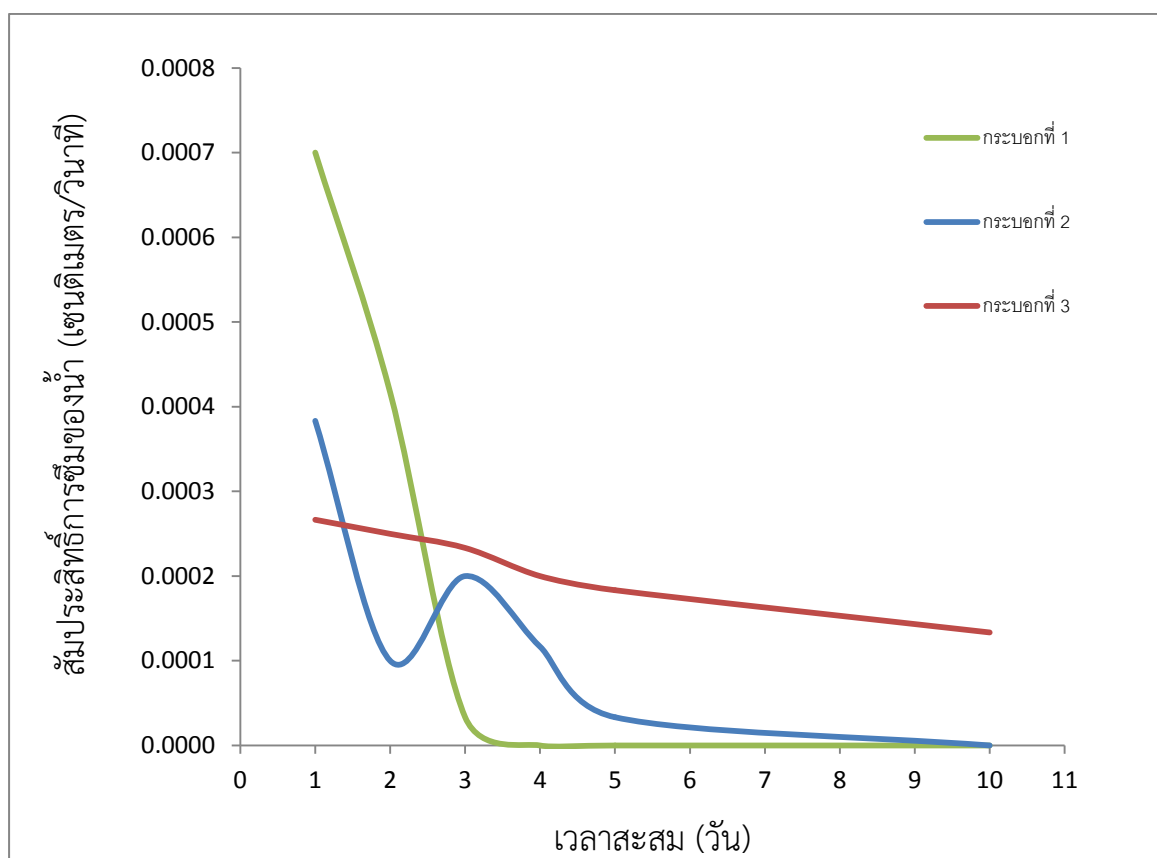
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 8			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	2.67E-04	2.67E-04		2.67E-04
2	2.17E-04	3.00E-04		2.58E-04
3	1.83E-04	2.67E-04		2.25E-04
4	1.83E-04	1.50E-04		1.67E-04
5	1.50E-04	8.33E-05		1.17E-04
10	0.00	0.00		0.00



รูปภาคผนวกที่ 8 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 8%

ตารางภาคผนวกที่ 9 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 9

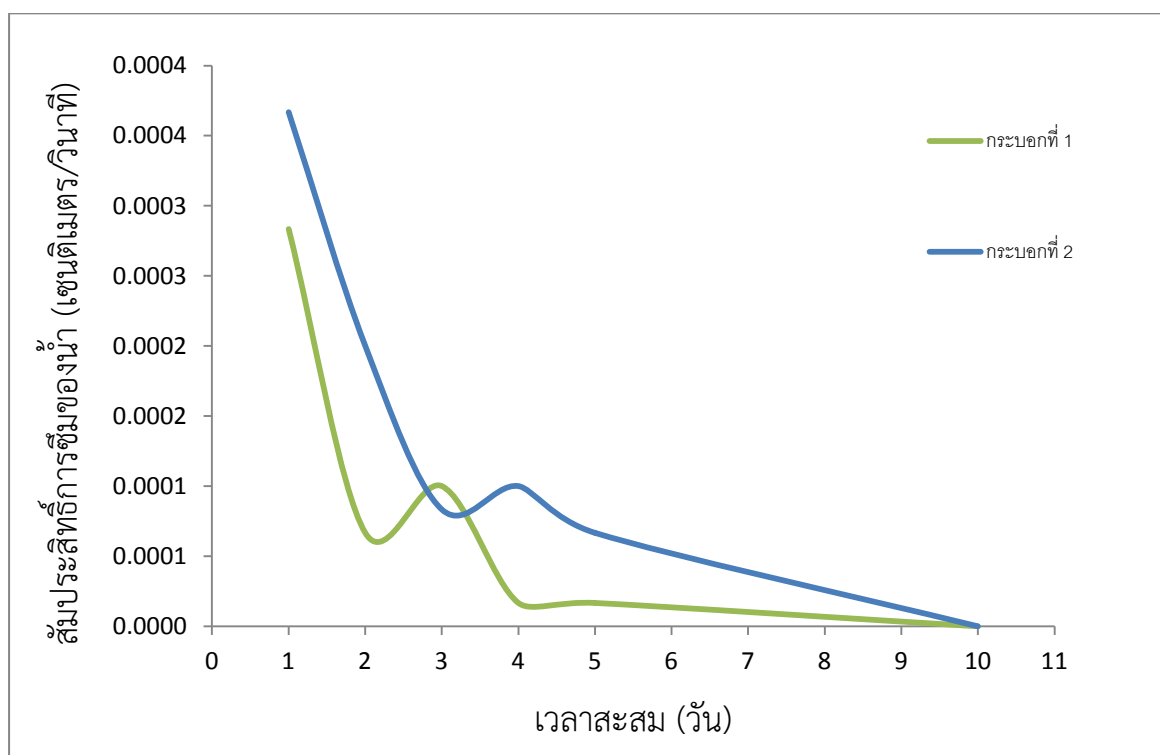
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 9			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	7.00E-04	3.83E-04	2.67E-04	4.50E-04
2	4.17E-04	1.00E-04	2.50E-04	2.56E-04
3	3.33E-05	2.00E-04	2.33E-04	1.56E-04
4	0.00E+00	1.17E-04	2.00E-04	1.06E-04
5	0.00E+00	3.33E-05	1.83E-04	7.22E-05
10	0.00	0.00	0.00	0.00



รูปภาคผนวกที่ 9 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 9%

ตารางภาคผนวกที่ 10 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 10

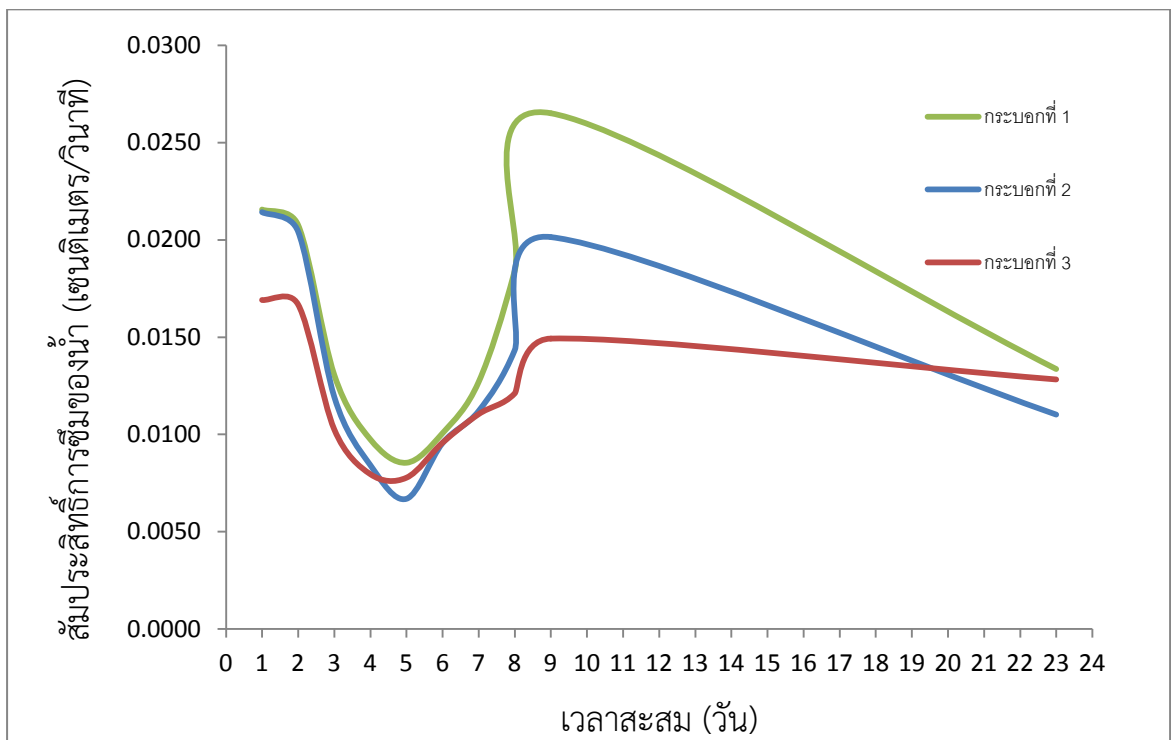
เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 10			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	2.83E-04	3.67E-04		3.25E-04
2	6.67E-05	2.00E-04		1.33E-04
3	1.00E-04	8.33E-05		9.17E-05
4	1.67E-05	1.00E-04		5.83E-05
5	1.67E-05	6.67E-05		4.17E-05
10	0.00	0.00		0.00



รูปภาคผนวกที่ 10 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ 10%

ตารางภาคผนวกที่ 11 อัตราการซึมของตัวอย่างทดลองที่ 11

เวลา (วัน)	ตัวอย่างทดลองที่ 11			
	อัตราการซึม (เซนติเมตร/วัน)			
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	2.16E-02	2.14E-02	1.69E-02	2.00E-02
2	2.08E-02	2.04E-02	1.67E-02	1.93E-02
3	1.31E-02	1.19E-02	1.03E-02	1.18E-02
4	9.75E-03	8.42E-03	7.97E-03	8.71E-03
5	8.55E-03	6.68E-03	7.78E-03	7.67E-03
6	1.01E-02	9.55E-03	9.58E-03	9.73E-03
7	1.27E-02	1.12E-02	1.11E-02	1.17E-02
8	1.84E-02	1.43E-02	1.21E-02	1.50E-02
9	2.65E-02	2.02E-02	1.49E-02	2.05E-02
23	1.34E-02	1.10E-02	1.28E-02	1.24E-02



รูปภาคผนวกที่ 11 กราฟอัตราการซึมของดินลูกรังที่ไม่ผสมเบนโทไนต์

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K)

วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K)

$$\text{จากสูตร} \quad K = \frac{QL}{Ah}$$

เมื่อ

K = ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างดิน , ซม./วินาที

Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ , ซม.³ / วินาที

L = ความยาวของตัวอย่างดิน , ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน , ซม.²

h = ความต่างของระดับน้ำ , ซม.

1. คำนวณหาอัตราการไหล (Q) ซม.³ / วินาที
โดยนำน้ำที่ได้จากการทดลองมาชั่งน้ำหนัก แล้วหารด้วยช่วงเวลาที่ทดสอบ ในที่นี้คือ 10 นาทีหรือ 600 วินาที
2. วัดความยาวของกระบอกทดสอบ (L) เท่ากับ 25 ซม.
3. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของกระบอกทดสอบ (A) จาก $\pi r^2 = (22/7) * (4.352)^2 = 59.53$ ซม.²
4. หาความต่างของระดับน้ำ (h) 120 ซม.

วันที่	Q (มม./วินาที หรือ ซม. ³ /วินาที)			Q เฉลี่ย	สปส.การซึมผ่านของน้ำ (K) (ซม./วินาที)
	กระบอกที่ 1	กระบอกที่ 2	กระบอกที่ 3		
1	0.00346667	0.01000000	0.00271667	0.005394	1.888E-05
2	0.00185000	0.00290000	0.00570000	0.003483	1.21913E-05
3	0.00323333	0.00145000	0.00241667	0.002367	8.28311E-06
4	0.00113333	0.00090000	0.00073333	0.000922	3.22769E-06
5	0.00121667	0.00000000	0.00106667	0.000761	2.66382E-06
6	0.00096667	0.00051667	0.00071667	0.000733	2.5666E-06
7	0.00055000	0.00048333	0.00063333	0.000556	1.94439E-06
8	0.00050000	0.00025000	0.00058333	0.000444	1.55551E-06
9	0.00065000	0.00043333	0.00066667	0.000583	2.04161E-06
10	0.00028333	0.00016667	0.00023333	0.000228	7.97201E-07

ตัวอย่างการคำนวณของดินลูกรังผสมเบนโทไนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง

จาก
$$K = \frac{QL}{Ah}$$

$Q_{\text{เฉลี่ย}} \text{ วันที่ } 10 = 0.000228 \text{ ซม.}^3 / \text{วินาที}$

$L = 25 \text{ ซม.}$

$A = 59.53 \text{ ซม.}^2$

$h = 120 \text{ ซม.}$

$$K = \frac{0.000228 \times 25}{59.53 \times 120}$$

$K = 7.97 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร/วินาที}$